

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski strokovni študij  
gradbeništva, Prometno tehnološka  
smer

Kandidat:

**Mario Mazurek**

**RAZISKAVE VOLUMSKIH DEFORMACIJ  
ZEMLJIN ZARADI ZMRZOVANJA IN  
TAJANJA**

**Diplomska naloga št.: 391**

**Mentor:**  
viš. pred. dr. Ana Petkovšek

Ljubljana, 2010

## IZJAVA O AVTORSTVU

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo,

Podpisani **MARIO MAZUREK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»RAZISKAVE VOLUMSKIH DEFORMACIJ ZEMLJIN ZARADI ZMRZOVANJA  
IN TAJANJA«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali na drugi univerzi ali izobraževalni inštituciji.

Ljubljana, 01. September 2010

---

(podpis)

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji Prometnotehnične smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.13/.14(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Mario Mazurek</b>
<b>Mentor:</b>	<b>viš. pred. dr. Ana Petkovšek</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Raziskave volumskih deformacij zemljin zaradi zmrzovanja in tajanja</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>78 str., 19 pregl., 76 sl., 13 en., 4 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>zemljine, zamrzovanje, tajanje, raziskave, zmrzlinški dvizek, zmrzlinška odpornost</b>

### **Izveček**

Poškodbe voziščnih konstrukcij so predvsem posledica prometnih in klimatskih obremenitev. V Sloveniji imamo raznolike klimatske razmere, zato je potrebno posebno pozornost nameniti dimenzioniranju, ustrezni izbiri materialov, ter ustreznih tehnologij gradnje in odvodnjavanja, da se prepreči nastajanje predčasnih poškodb. Merila za dimenzioniranje debelin plasti morajo biti prilagojena trdnostnim lastnostim podlage in njenemu volumenskem obnašanju med sezonskimi spremembami v okolju ceste. Klasični kriteriji za ocenjevanje zmrzlinške varnosti različnih plasti v vozišču, določeni s standardi in tehničnimi specifikacijami temeljijo na posrednih, indeksnih kazalnikih. To pomeni, da pri preiskavi ne merimo dejanskih odzivov materiala na vodo ali zmrzal, temveč presojo kakovosti izvedemo preko indeksnih kazalnikov. Zaradi vse večjih zahtev, tudi kriteriji kakovosti za agregate niso več enoviti, temveč se prilagajajo zahtevam posameznega projekta.

V svoji diplomski nalogi sem raziskoval dejanski odziv šestih različnih vrst materialov, ki se uporabljajo v cestogradnji glede na vpliv zamrzovanja in tajanja. Raziskave sem izvedel na Katedri za mehaniko tal UL FGG, osnovni namen raziskav pa je bil namenjen preveritvi primernosti in ponovljivosti rezultatov preizkušanja zmrzlinške odpornosti zemljin in kamenih agregatov z uporabo enodimenzijskega cikličnega sistema zmrzovanja in tajanja in enodimenzijskega odprtega sistema zmrzovanja in tajanja z omogočenim nadzorovanjem nastanka ledenih leč. Rezultat in analiza raziskave je primerjava rezultatov volumskih deformacij zemljin in ocena primernosti rezultatov pri določevanju zmrzlinške varnosti materialov.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 624.13/.14(043.2)  
**Author:** Mario Mazurek  
**Supervisor:** Ph. D. dr. Ana Petkovšek  
**Title:** Investigation of volume deformations of soils during freezing and thawing  
**Notes:** 78 p., 19 tab., 76 fig., 13 eq., 4 ann.  
**Key words:** soils, freezing, thawing, researches, frost heave, frost resistance

**Abstract**

Damages on road structures are mostly consequence of traffic loads and climate conditions. In Slovenia, are the climate conditions very severe, so special importance must be added on designing, selecting suitably materials and construction technologies and also draining, to prevent premature damages.

Standards for planning the thickness of layers must be accustomed to stiffness properties of road structure foundation and their volume behaviour, during seasonal changes in road environment. Classic criterions for estimating the frost safety of different layers in road construction, determined with standards and technical specifications are based on indirectal, index characteristics. It means, that material is not investigated for the actually behaviour due to influence of water supply or frost, but estimation of the quality uses index characteristics. Due to higher requirements, quality criterions of rock mixtures in unbound layers are not unity any more, but they are getting accustomed to requirements of the individual project. In my thesis, I present the results of experiments of volume deformations during freezing and thawing on six different type of soils. Investigation was made on Chair of Soil Mechanics with Laboratory UL FGG. The main intention of the investigation was to examine suitability and repeatability of the testing frost resistance results of soils and rock mixtures with used onedimensional cyclic freezing and thawing system and onedimensional open freezing and thawing system with controlling of formation of ice lenses. Result and analysis of the investigation is comparison of volume deformations of soils and to estimate their suitability for determining frost safety of the materials.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici dr. Ani Petkovšek za strokovno usmerjanje, nasvete in vodenje pri izdelavi diplomske naloge.

Za pomoč pri izvajanju laboratorijskih raziskav se zahvaljujem vsem sodelujočim na Katedri za mehaniko tal, za predloge in nasvete pri zasnovi eksperimenta pa je posebej zaslužen Matej Maček, univ. dipl. inž. grad., zato iskrena hvala tudi njemu.

Posebej bi se še rad zahvalil svoji mami Tanji, za vso pomoč, spodbudo in podporo v času študija.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNE OSNOVE</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Gibanje vode v vozišču</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Faktorji, ki vplivajo na zmrzlinško odpornost zemljin</b>	<b>3</b>
<b>2.3</b>	<b>Osnovne značilnosti zmrzovanja in tajanja</b>	<b>4</b>
<b>2.4</b>	<b>Ocena zmrzlinške odpornosti</b>	<b>6</b>
<b>2.5</b>	<b>Značilnosti finih zrn, kot zmrzlinško občutljivega materiala</b>	<b>8</b>
<b>2.6</b>	<b>Značilnosti kamnin pri vplivu zmrzovanja in tajanja</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>KLIMATSKI IN HIDROLOŠKI POGOJI PRI GRADNJI CEST</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Oprelitev pogojev</b>	<b>11</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Klimatske razmere</b>	<b>11</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Hidrološke razmere</b>	<b>11</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Vplivi na dimenzioniranje</b>	<b>12</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Poškodbe zaradi zmrzovanja in tajanja</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>EKSPERIMENTALNI PROGRAM</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiali v eksperimentu</b>	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>Opis eksperimenta</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Standardne preiskave</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1.1</b>	<b>Proctorjev preskus (DIN 18127)</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1.2</b>	<b>Določanje vpijanja vode po Enslin – Neff metodi (DIN 18132: 1995-12)</b>	<b>19</b>
<b>4.2.1.3</b>	<b>Metilen modro test (EN 933-9)</b>	<b>19</b>
<b>4.2.1.4</b>	<b>Ugotavljanje meje krčenja (ASTM D 4943-02)</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1.5</b>	<b>Preiskava sukcije zemljin</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1.5.1</b>	<b>Retenzijska krivulja</b>	<b>21</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Nestandardne preiskave zmrzovanja in tajanja zemljin</b>	<b>24</b>

<b>4.2.2.1</b>	<b>Ciklično zmrzovanje in tajanje zemljin</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2.1.1</b>	<b>Priprava vzorcev</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2.1.2</b>	<b>Metoda zmrzovanja in tajanja</b>	<b>26</b>
<b>4.2.2.2</b>	<b>Odprti sistem zmrzovanja in tajanja zemljin</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2.2.1</b>	<b>Priprava vzorcev</b>	<b>29</b>
<b>4.2.2.2.2</b>	<b>Metoda zmrzovanja in tajanja</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>REZULTATI EKSPERIMENTA IN RAZPRAVA</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Rezultati cikličnega zmrzovanja in tajanja zemljin</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Kamena moka</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1.1</b>	<b>Kamena moka 13%</b>	<b>35</b>
<b>5.1.1.2</b>	<b>Kamena moka 16%</b>	<b>37</b>
<b>5.1.1.3</b>	<b>Kamena moka 21%</b>	<b>38</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Glina Boršt</b>	<b>39</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Pesek Stahovica</b>	<b>42</b>
<b>5.1.3.1</b>	<b>Stahovica 10%</b>	<b>42</b>
<b>5.1.3.2</b>	<b>Stahovica 18%</b>	<b>43</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Pesek Stahovica 3</b>	<b>43</b>
<b>5.1.4.1</b>	<b>Stahovica 3 3%</b>	<b>44</b>
<b>5.1.4.2</b>	<b>Stahovica 3 9%</b>	<b>44</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Pesek Mokrice</b>	<b>45</b>
<b>5.1.5.1</b>	<b>Mokrice 15%</b>	<b>45</b>
<b>5.1.5.2</b>	<b>Mokrice 19%</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>Rezultati zmrzovanja in tajanja zemljin z odprtim sistemom</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Kamena moka in glina Boršt</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1.1</b>	<b>Kamena moka</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1.2</b>	<b>Glina Boršt</b>	<b>51</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Pesek Mokrice</b>	<b>53</b>
<b>5.2.2.1</b>	<b>Mokrice 15%</b>	<b>53</b>
<b>5.2.2.2</b>	<b>Mokrice 19%</b>	<b>54</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Pesek Stahovica</b>	<b>55</b>



---

<b>5.2.4</b>	<b>Pesek Stahovica 3</b>	<b>57</b>
<b>5.2.4.1</b>	<b>Stahovica 3 3%</b>	<b>57</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Nevezane nosilne plasti</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>ANALIZA ZMRZOVANJA IN TAJANJA ZEMLJIN</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Analiza cikličnega zmrzovanja in tajanja</b>	<b>63</b>
<b>6.2</b>	<b>Analiza odprtega sistema zmrzovanja</b>	<b>64</b>
<b>6.3</b>	<b>Primerjava volumskih deformacij z različnimi vplivi</b>	<b>66</b>
<b>6.3.1</b>	<b>Primerjava in vpliv deleža finih zrn na volumske deformacije</b>	<b>66</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Vpliv vrednosti metilen modro na volumske deformacije</b>	<b>67</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Gibanje temperature v vzorcih pri odprtem sistemu zmrzovanja</b>	<b>67</b>
<b>6.3.4</b>	<b>Primerjava in vpliv <math>w</math> (%) in <math>S_r</math> (%) na volumske deformacije</b>	<b>69</b>
<b>6.3.5</b>	<b>Primerjava sukcije zemljin z rezultati raziskave</b>	<b>69</b>
<b>6.4</b>	<b>Ocena materialov na podlagi raziskave</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>75</b>
<b>VIRI</b>		<b>77</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4.1: Materiali in njihova nahajališča	14
Preglednica 4.2: Materiali v raziskavi in njihove karakteristike	14
Preglednica 4.3: Lezne meje gline Boršt na zrnih manjših od 0,063 mm	15
Preglednica 4.4: Vzorci zemljin pri cikličnem zmrzovanju in tajanju	24
Preglednica 4.5: Vzorci zemljin pri odprtem sistemu zmrzovanja	29
Preglednica 5.1: Volumske deformacije pri cikličnem preizkusu	47
Preglednica 5.2: $\Delta w$ (%) pri cikličnem zmrzovanju in tajanju	48
Preglednica 5.3: $\Delta \rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) pri cikličnem zmrzovanju in tajanju	48
Preglednica 5.4: Volumske deformacije pri preizkusu z odprtim sistemom	61
Preglednica 5.5: $\Delta w$ (%) pri zmrzovanju in tajanju z odprtim sistemom	62
Preglednica 6.1: Razlika med začetnim $H_{vzorca}$ (mm) in končnim $H_{vzorca}$ (mm)	64
Preglednica 6.2: Vpliv deleža finih zrn na velikost deformacije	66
Preglednica 6.3: Vpliv deleža finih zrn v nevezanih plasteh na deformacije	67
Preglednica 6.4: Vpliv vrednosti $MB$ na velikost deformacije pri zmrzovanju	67
Preglednica 6.5: $\Delta T$ (°C) v vzorcu M 19% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	68
Preglednica 6.6: $\Delta T$ (°C) v vzorcu S3 3% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	68
Preglednica 6.7: $\Delta T$ (°C) v vzorcu KM 16% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	68
Preglednica 6.8: Vpliv $w$ (%) in $S_r$ (%) na velikost deformacije pri zmrzovanju	69
Preglednica 6.9: Primerjava vrednosti iz točke rezidualne vlage z vrednostmi $MB$	71

**KAZALO SLIK**

Slika 4.1: Krivulje zrnivosti materialov v raziskavi	15
Slika 4.2: Meja židkosti $w_L$ (%) in indeks plastičnosti $I_P$ (%) gline Boršt	15
Slika 4.3: Meja krčenja gline Boršt na zrnih manjših od 0,063 mm	16
Slika 4.4: Naprava za Proctorjev preskus	18
Slika 4.5: Pripravljeni vzorci za preizkus cikličnega zmrzovanja in tajanja	25
Slika 4.6: Prikaz toplotne izolacije vzorcev	25
Slika 4.7: Prečni prerez cikličnega zmrzovanja in tajanja vzorca zemljine	27
Slika 4.8: Merjenje deformacij na vzorcu pri cikličnem zmrzovanju	28
Slika 4.9: Vzorci med preiskavo cikličnega zmrzovanja in tajanja	28
Slika 4.10: Shematski prikaz razporeditve temperaturnih tipal v vzorcih	30
Slika 4.11: Vzorci v zamrzovalniku med zmrzovanjem z odprtim sistemom	31
Slika 4.12: Tlorisna postavitev vzorcev med zmrzovanjem z odprtim sistemom	31
Slika 4.13: Prečni prerez vzorca med zmrzovanjem z odprtim sistemom	32
Slika 4.14: Merjenje temperature na treh različnih višinah (slojih) v vzorcu	33
Slika 5.1: $\Delta w$ (%) vzorcev kamene moke med cikličnim preizkusom	34
Slika 5.2: $\Delta \rho_d$ ( $t/m^3$ ) vzorcev kamene moke med cikličnim preizkusom	35
Slika 5.3: KM 13% po končanem cikličnem preizkusu	35
Slika 5.4: Zunanja in notranja tekstura vzorca KM 13% na koncu raziskave	36
Slika 5.5: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca KM 13% med cikličnim preizkusom	36
Slika 5.6: Vzorec KM 16% po končanih raziskavah	37
Slika 5.7: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca KM 16% med cikličnim preizkusom	37
Slika 5.8: Vzorec KM 21% po končanih raziskavah	38
Slika 5.9: Zunanja tekstura vzorca KM 21% po končanih raziskavah	38
Slika 5.10: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca KM 21% med cikličnim preizkusom	39
Slika 5.11: $\Delta w$ (%) vzorca Boršt med cikličnim preizkusom	39
Slika 5.12: $\Delta \rho_d$ ( $t/m^3$ ) vzorca Boršt med cikličnim preizkusom	40
Slika 5.13: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca Boršt med cikličnim preizkusom	40
Slika 5.14: Deformacija gline Boršt ob iztiskanju iz valja	41
Slika 5.15: Glina Boršt po koncu preiskave cikličnega zmrzovanja in tajanja	41
Slika 5.16: $\Delta S_r$ (%) vzorcev pesek Stahovica med cikličnim preizkusom	42

Slika 5.17: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca S 10% med cikličnim preizkusom	42
Slika 5.18: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca S 18% med cikličnim preizkusom	43
Slika 5.19: $\Delta \rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) vzorca S3 med cikličnim preizkusom	43
Slika 5.20: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca S3 3% med cikličnim preizkusom	44
Slika 5.21: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca S3 9% med cikličnim preizkusom	44
Slika 5.22: $\Delta \rho_d$ (t/m <sup>3</sup> ) vzorcev peska Mokrice med cikličnim preizkusom	45
Slika 5.23: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca M 15% med cikličnim preizkusom	45
Slika 5.24: $\Delta \varepsilon_{zmrz}$ (%) in $\Delta \varepsilon$ (%) vzorca M 19% med cikličnim preizkusom	46
Slika 5.25: $\Delta h_{vzorca}$ (mm) KM in gline med zmrzovanjem z odprtim sistemom	49
Slika 5.26: $\Delta \varepsilon$ (%) KM in gline med med zmrzovanjem z odprtim sistemom	49
Slika 5.27: Vidne so ledene leče v spodnjem delu vzorca KM 13%	50
Slika 5.28: Približane ledene leče v spodnjem delu vzorca KM 13%	50
Slika 5.29: $\Delta T$ (°C) v vzorcu KM 16% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	51
Slika 5.30: KM 16% zgoraj in notranja tekstura po končanih raziskavah	51
Slika 5.31: Vidna je deformacija na glini Boršt v zgornjem delu	52
Slika 5.32: Vidne so razpoke in nastanek ledenih leč zgoraj na glini Boršt	52
Slika 5.33: Razpoke in tvorba ledene leče v zgornjem delu na glini Boršt	52
Slika 5.34: $\Delta h_{vzorca}$ (mm) pesek Mokrice med zmrzovanjem z odprtim sistemom	53
Slika 5.35: $\Delta \varepsilon$ (%) vzorcev pesek Mokrice med zmrzovanjem z odprtim sistemom	53
Slika 5.36: Vzorec M 15% po koncu raziskave brez večjih posebnosti	54
Slika 5.37: $\Delta T$ (°C) v vzorcu M 19% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	54
Slika 5.38: Vzorec M 19% po koncu raziskave	55
Slika 5.39: $\Delta h_{vzorca}$ (mm) pesek Stahovica med zmrzovanjem z odprtim sistemom	55
Slika 5.40: $\Delta \varepsilon$ (%) vzorcev pesek Stahovica med zmrzovanjem z odprtim sistemom	56
Slika 5.41: Vzorec S18% brez posebnosti po koncu raziskave	56
Slika 5.42: $\Delta h_{vzorca}$ (mm) Stahovica 3 med zmrzovanjem z odprtim sistemom	57
Slika 5.43: $\Delta \varepsilon$ (%) vzorcev Stahovica 3 med zmrzovanjem z odprtim sistemom	57
Slika 5.44: $\Delta T$ (°C) v vzorcu S3 3% med zmrzovanjem z odprtim sistemom	57
Slika 5.45: Vidna je ledena leča v srednjem zunanem delu vzorca S3 3%	58
Slika 5.46: Viden potek ledene leče na vzorcu Stahovica 3 3%	58
Slika 5.47: $\Delta h_{vzorca}$ (mm) tamponov med zmrzovanjem z odprtim sistemom	59
Slika 5.48: $\Delta \varepsilon$ (%) vzorcev tamponov med zmrzovanjem z odprtim sistemom	59

---

Slika 5.49: Viden je del votlih prostorov v vzorcu T2 na koncu raziskave	59
Slika 5.50: Vzorec T3, pogled od zgoraj na koncu raziskave	60
Slika 6.1: $\varepsilon_{max}$ (%) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjem	63
Slika 6.2: $\varepsilon_{zmrz. max}$ (%) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjem	63
Slika 6.3: $\Delta h_{max}$ (mm) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjem	64
Slika 6.4: $\varepsilon_{zmrz. max}$ (%) zemljin med zmrzovanjem z odprtim sistemom	65
Slika 6.5: $\Delta h_{max}$ (mm) med zmrzovanjem z odprtim sistemom	65
Slika 6.6: $\Delta h_{zmrz. max}$ (mm) med zmrzovanjem z odprtim sistemom	66
Slika 6.7: Desaturacija materiala Stahovica in Stahovica 3 z naraščanjem sukcije	69
Slika 6.8: Skupna primerjava retenzijskih krivulj zemljin v raziskavi	70
Slika 6.9: Upadanje koeficienta vodoprepustnosti na pesku Stahovica	72
Slika 6.10: Prikaz naraščanja sukcije po dnevih na materialu Stahovica	72
Slika 6.11: Volumske deformacije materialov pri cikličnem zmrzovanju in tajanju	74
Slika 6.12: Volumske deformacije materialov pri odprtem sistemu zmrzovanja	74

## POMEN STROKOVNIH POJMOV

STROKOVNI POJEM	POMEN
Ciklično zmrzovanje in tajanje	Ponavljajoči se pojav zmrzovanja in tajanja zemljine
Enodimenzijsko zmrzovanje in tajanje	zmrzovanje in tajanje zemljine, ki poteka samo v eni smeri (na primer, vertikalno zmrzovanje samo od zgoraj navzdol)
Globina zmrzovanja	največja globina, do katere seže izoterma 0 °C
Klimatski pogoji	pogoji, ki jih opredeljujejo temperature zraka v določenem časovnem obdobju in na določenem kraju ali področju
Ledena leča	značilna oblika porne vode, ki nastane pri zmrzovanju zaradi povečanja vsebnosti vode v materialu
Nevezana nosilna plast	praviloma najnižja nosilna plast v voziščni konstrukciji, ki je mehansko stabilizirana in sestavljena iz zmesi naravnih, drobljenih ali mešanih kamnitih zrn
Odprti sistem zmrzovanja	zmrzovanje, ki se dogaja z gibanjem porne vode k virom do nastanka ledenih leč
Poškodba zaradi zmrzovanja	poškodba, ki je posledica učinkovanja mraza v povezavi z vodo; pomeni lahko porušitev objekta
Preskus	tehnično opravilo, s katerim se po točno določenem postopku izvede določitev ene ali več značilnosti obravnavanega izdelka, postopka ali storitve
Relativna zmrzljinska občutljivost	velikost zmrzljinskega dvižka zemljine v razmerju do drugih zemljin

STROKOVNI POJEM	POMEN
Sestava zmesi zrn	pomeni v razrede porazdeljeno zmes zrn, ponazorjeno s krivulji v ustreznem diagramu
Tajanje	sklop fizikalnih pojavov, ki nastajajo v materialih, ko po obdobju zmrzovanja temperatura naraste nad 0 °C
Voziščna konstrukcija	del utrditve prometne površine, ki je zgrajen iz ene ali več nosilnih slojev in obrabne plasti. Prevzema prometne obremenitve in jih prenaša na podlago (nasip, temeljna tla), ter zmanjšuje pronicanje vode do podlage
Zmrzlinški dvižek	lokalni dvig vozišča ali zemljine v smeri zmrzovanja zaradi nastanka ledenih leč v materialu
Zmrzlinško odporen material	material, v katerem zmrznjena porna voda ne povzroči pomembnejšega dvižka niti tajanje pomembnejšega zmanjšanja nosilnosti
Zmrzovanje	sklop fizikalnih pojavov, ki nastajajo v materialih, ko znaša temperatura manj kot 0 °C

## POMEN SIMBOLOV

$c$  – metilen modro raztopina (koncentracija).

$e$  – količnik por.

$h_0$  – referenčna vrednost višine vzorca za zmrzovanje (mm).

$I_C$  – indeks konsistence.

$I_P$  – indeks plastičnosti (%).

$k$  – koeficient vodoprepustnosti (cm/s).

K – Kelvin ( $0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$ ).

$m$  – masa (g).

$m_d$  – masa suhe zemljine (g).

$m_s$  – masa trdnih delcev zemljine (g).

$m_w$  – masa porne vode (g).

$m_z$  – masa zemljine (g).

$MB$  – metilen modro vrednost (g/kg).

$n$  – poroznost.

$pF$  – negativni desetiški logaritem vodnega stolpca (cm).

$S_r$  – stopnja saturacije (%).

$t$  – čas (sec).

$V$  – volumen ( $\text{cm}^3$ ).

$V_s$  – volumen trdnih delcev zemljine ( $\text{cm}^3$ ).

$V_v$  – volumen por ( $\text{cm}^3$ ).

$V_w$  – volumen vode ( $\text{cm}^3$ ).

$V_z$  – volumen zemljine ( $\text{cm}^3$ ).

$w$  – vlažnost (%).

$w_A$  – Sposobnost vpijanja vode materiala (absorpcija vode) (%).

$w_L$  – meja židkosti (%).

$w_{opt}$  – optimalna vlažnost zemljine (%).

$w_P$  – meja plastičnosti (%).

$w_S$  – meja krčenja (%).

$w_{zač.}$  – začetna vlažnost zemljine pred zmrzovanjem in tajanjem (%).

$z_0$  – umeritev merilne urice, za merjenje deformacij zmrzovanja in tajanja (mm).



$\gamma$  – prostorninska teža ( $\text{kN/m}^3$ ).

$\gamma_d$  – suha prostorninska teža ( $\text{kN/m}^3$ ).

$\varrho$  – gostota ( $\text{t/m}^3$ ).

$\varrho_w$  – gostota vode pri  $18^\circ \text{C} = 0,999 \text{ t/m}^3$ .

$\varrho_i$  – gostota ledu pri  $0^\circ \text{C} = 0,920 \text{ t/m}^3$ .

$\varrho_s$  – specifična gostota ( $\text{t/m}^3$ ).

$\varrho_d$  – suha gostota ( $\text{t/m}^3$ ).

$\varrho_{d \max}$  – največja suha gostota ( $\text{t/m}^3$ ).

$\varepsilon$  – deformacija vzorca zaradi vpliva vpijanja vode in zmrzovanja/tajanja (%).

$\varepsilon_{zmrz}$  – deformacija vzorca zaradi vpliva zmrzovanja/tajanja (%).

$\varepsilon_{\max}$  – maksimalna deformacija vzorca zaradi vpliva vpijanja vode in zmrzovanja/tajanja (%).

$\varepsilon_{zmrz, \max}$  – maksimalna deformacija vzorca zaradi vpliva zmrzovanja/tajanja (%).

$\Delta h_{\max}$  – maksimalni zmrzlinški dvižek vzorca zaradi vpliva vpijanja vode in  
zmrzovanja/tajanja (%).

$\Delta h_{zmrz, \max}$  – maksimalni zmrzlinški dvižek vzorca zaradi vpliva zmrzovanja/tajanja (%).

$\Psi$  – totalna sukcijska (kPa).

## ENAČBE V RAZISKAVI

Vlačnost  $w$ :

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

Gostota  $\rho$ :

$$\rho = \frac{m_z}{V_z} \text{ [t/m}^3\text{]} \quad (2)$$

Suha gostota  $\rho_d$ :

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{w * \rho_s}{S_r * \rho_w}} = \frac{\rho}{1 + w} \text{ [t/m}^3\text{]} \quad (3)$$

Specifična prostorninska gostota zemljine  $\rho_s$ :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \text{ [t/m}^3\text{]} \quad (4)$$

Količnik por  $e$ :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

Poroznost ali delež por  $n$ :

$$n = \frac{V_v}{V} * 100 \text{ [%]} = \frac{e}{1+e} \quad (6)$$

Stopnja saturacije ali stopnja zasičenosti z vodo zemljine  $S_r$ :

$$S_r \cdot \rho_w \cdot e = w \cdot \rho_s$$

↓ sledi enačba

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{\rho_w \cdot e} = \frac{\rho_d \cdot w \cdot \rho_s}{(\rho_s \cdot \rho_w) - (\rho_d \cdot \rho_w)} = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

(Kadar je  $S_r = 1$ , je zemljina 100% zasičena z vodo. Povsem suha zemljina,  $S_r = 0$ )

Indeks plastičnosti  $I_P$ :

$$I_P = w_L - w_P \quad [\%] \quad (8)$$

Indeks konsistence  $I_C$ :

$$I_C = \frac{w_L - w}{I_P} = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad (9)$$

Metilen modro vrednost  $MB$ :

$$MB = \frac{c \cdot V}{m_z} = \frac{(0,01 \text{ g/ml}) \cdot \text{ml}}{\text{kg}} = [\text{g/kg}]$$

↓ sledi enačba

$$MB = \frac{V}{m_z} \cdot 10 \quad [\text{g/kg}] \quad (10)$$

Adsorpcija za vodo po Enslin - Neffu  $w_A$ :

$$w_A = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Deformacija vzorca zaradi vpliva vpijanja vode in zmrzovanja ali tajanja  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{H_{\text{vzorca}} - H_{\text{vzorca, začetni}}}{H_{\text{vzorca, začetni}}} * 100 \text{ [%]} \quad (12)$$

Deformacija vzorca zaradi vpliva zmrzovanja ali tajanja  $\varepsilon_{\text{zmrz}}$ :

$$\varepsilon_{\text{zmrz}} = \frac{H_{\text{vzorca}} - H_{\text{vzorca, namočen}}}{H_{\text{vzorca, namočen}}} * 100 \text{ [%]} \quad (13)$$



## 1 UVOD

Voziščne konstrukcije so izpostavljene obremenitvam zaradi prometa in obremenitvam, ki izvirajo iz okolja. Z ustrezno izbiro materialov in ustreznih debelin nevezanih in vezanih plasti vozišč zagotavljamo, da bo voziščna konstrukcija v načrtovani življenski dobi sposobna prevzeti načrtovane obremenitve.

Povečani promet in ekstremne vremenske razmere so pogosti vzrok nastanka predčasnih poškodb. Do njih pa lahko pride tudi zaradi nepravilnega dimenzioniranja, uporabe neustreznih materialov in neustreznih tehnologij gradnje ali neustreznega odvodnjavanja.

Za zagotavljanje dobrega odvodnjavanja in ustrezne vremenske in zmrzlinke varnosti vozišča so pomembne tri plasti:

- Nevezana nosilna plast ali tampon
- Kamnita posteljica
- Podlaga (temeljna tla ali planum nasipa)

Na kakovost podlage pri načrtovanju cest ne moremo bistveno vplivati. Škodljive vplive, ki izvirajo iz podlage, kot so na primer velika občutljivost zemljine na vodo, na tvorjenje ledenih leč, na mehčanje itd., običajno kompenziramo z zadostnimi debelinami plasti iz kamnitih materialov ali z uporabo postopkov kemične stabilizacije. Pri tem je pomembno vedeti, da se na videz podobne podlage, na primer iz zemljin, lahko v času vlaženja, sušenja in zamrzovanja obnašajo zelo različno. Zato morajo biti merila za dimenzioniranje debelin kamnitih plasti prilagojena tako trdnostnim (togostnim) lastnostim podlage, kot njenemu volumskemu obnašanju v času sezonsko pogojenih sprememb v okolju ceste.

Kriteriji za ocenjevanje zmrzlinke varnosti materialov za različne plasti v vozišču in podlagi so določeni z različnimi standardi in tehničnimi specifikacijami. Klasični kriteriji za ocenjevanje zmrzlinke varnosti temeljijo na posrednih, indeksnih kazalnikih. To pomeni, da pri preiskavi ne merimo dejanskih odzivov materiala na vodo ali zmrzal, temveč presojo kakovosti izvedemo preko indeksnih kazalnikov kot so krivulja zrnivosti, plastičnost, ekvivalent peska finih zrn, odpornosti posameznega zrna na zmrzal, itd.

Vendar pa se zahteve glede rabe naravnih materialov vse bolj zaostrejejo zaradi pomanjkanja kvalitetnih surovin in zaradi omejevanja možnosti odpiranja novih kamnolomov in gramoznic. Zato tudi kriteriji kakovosti za kamni agregat za nevezane plasti in kamnito posteljico niso več enoviti, temveč se prilagajajo zahtevam posameznega projekta. To se kaže na ta način, da se je v novih standardih uveljavil sistem klasificiranja materialov po razredih.

V svoji diplomski nalogi sem raziskoval dejanski odziv šestih različnih vrst materialov, ki se uporabljajo v cestogradnji na zamrzovanje in tajanje. Raziskave sem izvedel na Katedri za mehaniko tal UL FGG, osnovni namen raziskav pa je bil namenjen preveritvi primernosti in ponovljivosti rezultatov preizkušanja zmrzljinske odpornosti zemljin in kamenih agregatov z uporabo enodimenzijskega cikličnega sistema zmrzovanja in tajanja in enodimenzijskega odprtega sistema zmrzovanja in tajanja z omogočenim nadzorovanjem nastanka ledenih leč.



Poškodbi na vozišču zaradi vpliva zmrzovanja in tajanja  
(Vir: <http://www.motorevija.si/>, 13.7.2010)

## **2 TEORETIČNE OSNOVE**

### **2.1 Gibanje vode v vozišču**

Za obnašanje nevezanih materialov v času zmrzovanja in tajanja so najpomembnejše pore, oziroma vrsta pornega prostora v zemljini ali kamenem agregatu.

Voda vstopa in izstopa v porni prostor, ter se v njem giblje na različne načine:

- S pronicanjem zaledne vode
- Z dvigovanjem in spuščanjem gladine podzemne vode
- Preko kapilarne cone
- Preko padavin, ki pronicajo preko asfaltnih površin, ter iz bankin
- S tajenjem snega na bankinah
- Preko vodne pare

### **2.2 Faktorji, ki vplivajo na zmrzlinško odpornost zemljin**

Obnašanje pri zmrzovanju in tajanju različnih zemljin je odvisno od vpliva številnih faktorjev, kateri imajo precejšnji medsebojni vpliv.

Faktorji zemljine so:

- Zrnavostna sestava in delež finih zrn
- Kemijske lastnosti zemljine
- Mineralna zgradba zrn
- Organske komponente
- Stopnja saturacije
- Gostota zemljine
- Hidravlična prepustnost
- Kapilarnost
- Strižna trdnost
- Sukcija zemljine



Faktorji okolja:

- Nivo talne vode
- Razpoložljivost in dovajanje vode (padavine, voda ki pronica, podzemna voda)
- Temperatura, hidravlični gradient in kemijske lastnosti podzemne vode
- Temperaturne razmere (magnituda in perioda temperature zmrzovanja; temperaturni gradient)
- Lokalne klimatske razmere, predvsem cikli zmrzovanja in tajanja
- Prevelika obtežba
- Interakcija posameznih slojev konstrukcije pri večslojni voziščni konstrukciji

### 2.3 Osnovne značilnosti zmrzovanja in tajanja

Voda zmrzuje pri približno 0 °C. Pri tem se njena specifična prostornina poveča za približno 10,0 %, gostota pa zmanjša za približno 9,0 %.

Zmanjšanje vsebnosti nezamrznjene vode v materialu pogojuje nastanek podtlaka (natezne napetosti), ki povzroči dotok vode predvsem iz območja pod globino zamrzovanja. Voda se vedno giba iz toplejšega proti hladnejšemu območju. Zmrzlinški dvižki nastajajo tako, da voda po dotoku v območje zmrzovanja povzroči nastanek ledenih leč in plasti, ki zmrznjeni material razrivajo in dvigujejo in povzročajo razpoke v zemljini. Med tajanjem se lahko zrna razmaknejo in zaprejo razpoke in pore, ali pa ne. Volumen narašča med zmrzovanjem zaradi nastanka ledenih leč in upada med tajanjem zaradi konsolidacije zemljine. Gostota se lahko poveča in večja zrna zemljine se lahko pomaknejo bolj skupaj. Delci pa so lahko tudi na enakem mestu po zmrzovanju in tajanju, kot so bili pred zmrzovanjem. Količnik por se lahko v gostejši zemljini zaradi zmrzovanja in tajanja poveča, ker se med tajanjem delci mogoče ne vrnejo v prvotni položaj.

Nastajanje ledenih leč v materialu je odvisno od:

- Vsebnosti vode
- Zrnastostne sestave
- Vodoprepustnosti materiala
- Trajanja in intenzivnosti zmrzovanja

Izkušnje kažejo, da so na zmrzovanje odporni debelozrnati materiali, ki so dobro prepustni, kakor tudi zemljine (gline, ki nimajo nevarne mineralne zgradbe), ker otežujejo dotok porne vode v območje zmrzovanja. Z naraščanjem deleža drobnih zrn (v meljnih peskih in meljih) pa se nevarnost nastanka ledenih leč v materialu zelo poveča. Prodiranje meje zmrzovanja je globlje in hitrejše, čim intenzivnejši je mraz in čim daljše je njegovo učinkovanje.

Pri tajanju se najprej odtajajo zgornji deli zamrznjene plasti, medtem ko so spodnji še naprej zamrznjeni in zato neprepustni za vodo. Odtajena presežna voda zastaja v odtajeni plasti in pod prometnimi obremenitvami zaradi naraščanja pornega tlaka izgublja trdnost po naslednji relaciji:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) * \operatorname{tg} \varphi'$$

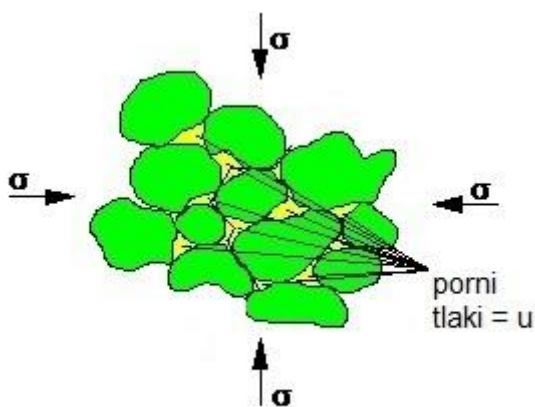
kjer je:

$\tau_f$  = strižna trdnost zemljine (kPa)

$c'$  = kohezija zemljine (kPa)

$(\sigma - u)$  = efektivna napetost (kPa)

$\varphi'$  = strižni kot zemljine (°)



Napetost v zemljini (Vir: COST, 2002)

## 2.4 Ocena zmrzljinske odpornosti

Klasično ocenjevanje zmrzljinske odpornosti zemljin in kamenega agregata, temelji na indeksnih kazalnikih lastnosti, kot so pri zemljinah:

- Atterbergove meje plastičnosti
- Zrnastostna sestava, predvsem vsebnost finih zrn  $< 0,063$  mm in  $0,02$  mm

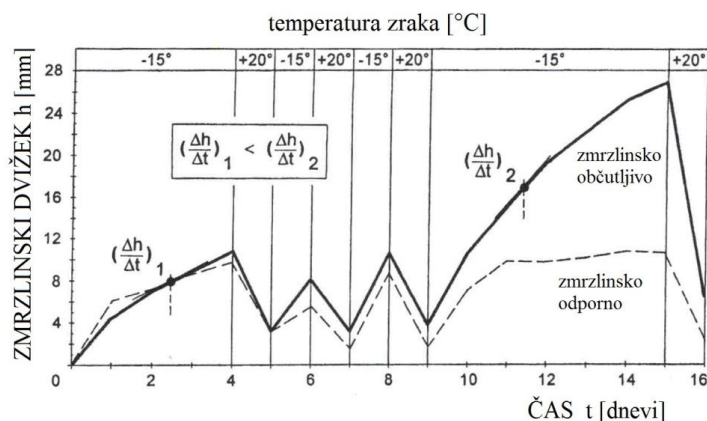
Pri kamenem agregatu pa so kazalniki:

- Ekvivalent peska in metilen modro za oceno vrste finih zrn
- Zmrzljinsko odpornost na agregatih določamo ali s kristalizacijo v soli ali z direktnim preizkusom upada tlačne trdnosti po ciklih zmrzovanja

Napredno raziskovanje odzivov plasti na zamrzovanje in tajanje, pa temelji na debelinah slojev. Lahko se opravijo preizkusi zmrzovanja in tajanja v laboratoriju, ali na terenu. Preizkus mora potekati v pogojih, ki so na mejnem stanju, zagotovljena mora biti zadostna oskrba vzorcev z vodo med zmrzovanjem in tajanjem, če uporabljamo odprti sistem zmrzovanja. Pomembni faktor je tudi število ciklov zmrzovanja in tajanja.

Dosledno določeni preizkusni pogoji so nujni predpogoj za ponovljive in primerljive rezultate. Ne obstajajo splošno veljavni modeli zakonov, kot na primer pri mehaniki tekočin.

V zadnjih letih raziskovanja preizkusov zmrzovanja in tajanja na zemljinah in kamenih agregatih, so se sproti spreminjale dimenzije vzorcev, temperature zraka in vode v zemljini, trajanje in število ciklov zmrzovanja in tajanja in obtežbe, zaradi preučevanja vpliva številnih parametrov, ter za razvoj praktičnega preizkusnega postopka. Dopusni zmrzljinski dvizek je odvisen od sloja in od prometne obtežbe.



Preizkus zmrzovanja in tajanja na peščenih prodih (Vir: Brandl, 2001)

Praktični predlagani primeri za splošne standardne preizkuse (Brandl, 2001):

- Dimenzija vzorca zemljine (CBR cilindri)  $d:h = 15,0:12,5$  cm
- temperatura zmrzovanja in tajanja  $-15,0$  °C do  $+20,0$  °C
- število ciklov zmrzovanja in tajanja 4
- število daljših globokih zmrzlinških period 2
- temperatura podzemne vode  $4,0$  °C
- trajanje preizkusa 16 dni
- maksimalni dopustni zmrzlinški dvižek  $1,0$  do  $2,5$  cm
- minimalna CBR vrednost po tajanju 20 do 25 %

Klasifikacija zmrzlinške občutljivosti zemljin (Vir: ASTM D 5918 – 06, 2009)

Zmrzlinška občutljivost	Stopnja zmrzlinškega dvižka mm/dan
Neznatna	< 1
Zelo nizka	1 - 2
Nizka	2 - 4
Srednja	4 - 8
Visoka	8 - 16
Zelo visoka	> 16

## 2.5 Značilnosti finih zrn, kot zmrzlinsko občutljivega materiala

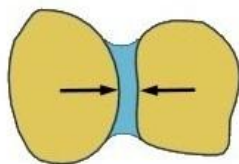
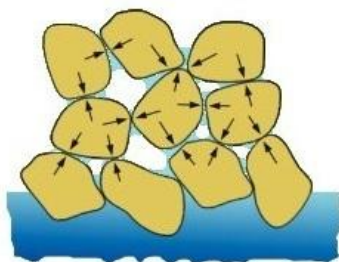
Pod pojmom "finih zrn" zajemamo vsa zrna v zemljini ali kamenem agregatu, ki so manjša od 0,063 mm. Pod pojmom "glina" pa različne stroke razumejo različne definicije.

V geotehniko je glina (CL, CH) vsaka zemljina, ki vsebuje več kot 50,0 % finih zrn in se v AC diagramu nahaja nad "A" linijo.

V mineralogiji se pod pojmom "glina" opisujejo minerali iz skupine mineralov glin, med katerimi so glavni:

- Kaolinit
- Montmorilonit
- Ilit
- Klorit

Vsaka vrsta gline ima karakteristične lastnosti. Specifičnost glinenih zemljin je v tem, da lahko v svojo strukturo vpijejo različno velike količine vode in da porni prostor zavzema veliki volumen, praktično neprehoden za tok vode. Zato glina, ki se razmoči, glavnino vode izpusti samo s sušenjem. Nekatere vrste glin so ocenjene kot relativno neaktivne, medtem ko prisotnost majhne količine drugih vrst lahko značilno vpliva na lastnosti agregatov.

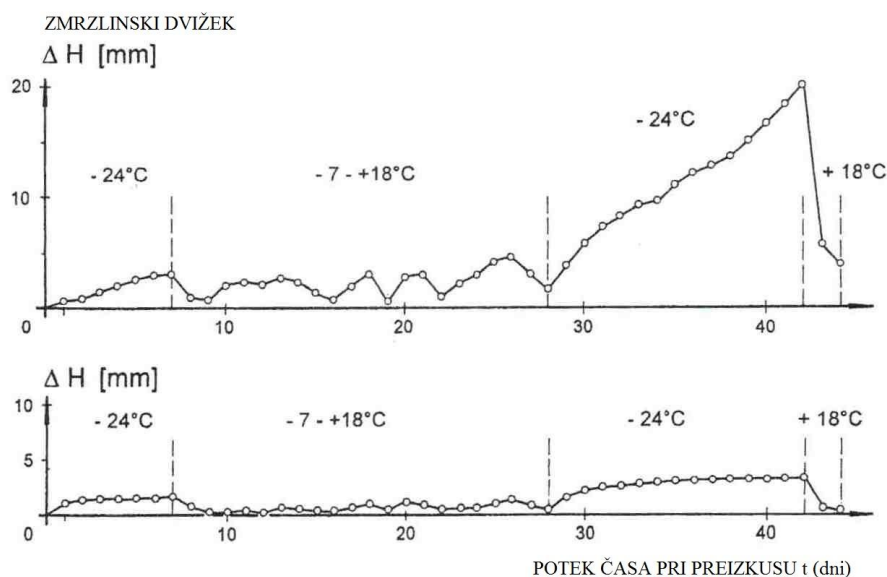


Kapilarne sile v nesaturirani zemljini (Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)

## 2.6 Značilnosti kamnin pri vplivu zmrzovanja in tavanja

Prekomerno nastajanje ledenih leč je možno tudi v kamninah.

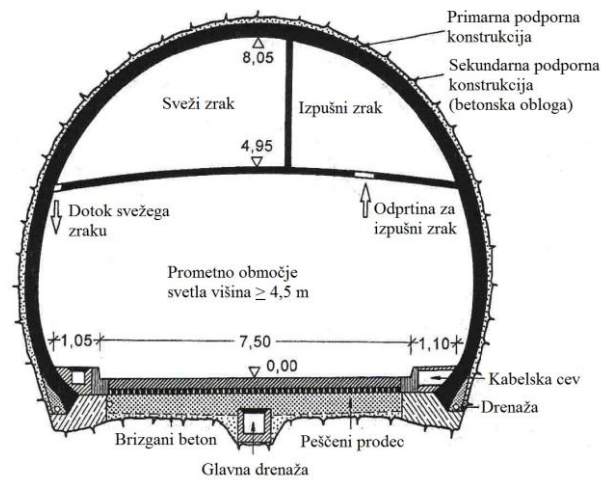
Povečanje prostornine kadar voda zmrzuje presega blizu 9,0 % celotne prostornine, ker se sile vpijanja v zmrzlinso občutljivi kamnini razvijejo podobno kot pri zemljinah. Kritične kamnine so na primer lapor, fliš, skrilavci in tiste zemljine, ki so nastale s preobrazbo iz skrilavcev in še vedno vsebujejo minerale glin. Adsorbirana voda okrog zrn povzroči gibanje vode iz nezamrznjenih območij do 0,0 °C. Skrilavci so tipičen primer kamnin, kateri so pri praktičnih preizkusih zmrzovanja in tavanja v laboratoriju pokazali značilni zmrzliniski dvižek in izgubo nosilnosti.



Zmrzliniski dvižek visoko in nizko zmrzlinso občutljive kamnine (Vir: Brandl, 2001)

Vremenska in še posebej zmrzliniska občutljivost mnogih kamnin, je zato pomembna za cestne podlage in za načrtovanje cest v predorih. Temperaturne meritve v hribovitih območjih so odkrile, da se okoli sto metrov od portalov predorov značilno spremeni temperatura v hribini, tudi pod ničlo. To je zaradi dinamičnosti zraka, ki ga povzroča promet.

Peščeni prod ali drobljeni kamniti material, ki izpolnjuje običajne kriterije kvalitete kot so zrnavostna sestava, mineralna zgradba in zgoščenost, se uporablja za zmrzlinso odporne nosilne konstrukcije in drenažni sloj.



Prerez konstrukcije cestnega predora v avstrijskih Alpah v zmrzljivo občutljivi kamnini blizu portalov (Vir: Brandl, 2001)

### 3 KLIMATSKI IN HIDROLOŠKI POGOJI PRI GRADNJI CEST

#### 3.1 Opredelitev pogojev

Klimatski in hidrološki pogoji so v Sloveniji določeni s Tehnično specifikacijo za javne ceste TSC 06.512:2003. Tehnična specifikacija določa ugodne in neugodne pogoje, ter razmere pri gradnji cest.

##### 3.1.1 Klimatske razmere

Pri oceni lastnosti zgrajenih voziščnih konstrukcij, oziroma vgrajenih materialov zaradi zmrzovanja in tajanja je potrebno upoštevati najneugodnejše predvidljive lokalne pogoje.

##### 3.1.2 Hidrološke razmere

Hidrološke razmere so določene z:

- Nivojem talne vode in globino zmrzovanja
- Občutljivostjo materiala na zmrzovanje

Hidrološke razmere so ugodne, če je:

- Nasip ceste visok najmanj 1,5 m
- Gladina talne vode stalno globlje od globine zmrzovanja  $h_m$
- Plitvi vkop dobro odvodnjava
- Nad gladino talne vode preprečeno dotekanje vode v cestno telo s strani ali s površine

Hidrološke razmere so neugodne, če je:

- Nasip ceste nižji od 1,5 m
- Gladina talne vode v območju globine zmrzovanja  $h_m$
- Plitvi vkop slabo odvodnjava
- Vkop je globok
- Omogočeno kapilarno dviganje vode ali dotekanje vode



### 3.1.3 Vplivi na dimenzioniranje

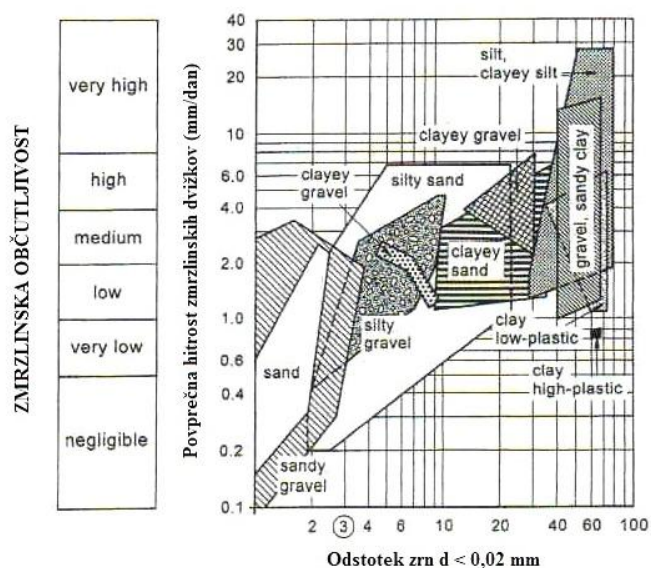
Izkušnje so pokazale, da najmanjša potrebna debelina voziščne konstrukcije  $h_{min}$  ni enaka izmerjeni največji globini prodiranja mraza  $h_m$ , ampak da praviloma zadostuje manjša skupna debelina plasti na zmrzovanje odpornih materialov  $h_{min}$ . Na tej osnovi je prirejena preglednica. Na osnovi ugotovljenih največjih globin prodiranja mraza v značilnih okoljih v Sloveniji, je v tehnični specifikaciji prikazana karta informativnih globin prodiranja mraza, ki omogoča enostavno in hitro določitev merodajne globine prodiranja mraza v določenem okolju.

Najmanjše potrebne debeline voziščnih konstrukcij  $h_{min}$  (Vir: TSC 06.512: 2003, 2003)

Odpornost materiala proti zmrzovanju in tajanju	Hidrološki pogoji	Debelina voziščne konstrukcije ( $h_{min}$ )
odporen	Ugodni	0,6 $h_m$
	Neugodni	0,7 $h_m$
neodporen	Ugodni	0,7 $h_m$
	neugodni	0,8 $h_m$

### 3.1.4 Poškodbe zaradi zmrzovanja in tajanja

Zmanjšana nosilnost voziščne konstrukcije v času tajanja lahko povzroči pod prometno obremenitvijo deformacije in razpoke. Tudi med zgoščevanjem na gradbišču in pod prometno obtežbo se zrna lahko drobijo in obrabljajo, zato je možno, da se poveča delež finih zrn v materialu. Vpliv deleža finih zrn na zmrzlinško odpornost zemljin je preučeval H. Brandl, (2001).



Vpliv deleža finih zrn  $< 0,02 \text{ mm}$  na zmrzlinsko občutljivost zemljin  
 (Vir: Brandl, 2001)

Po razvrstitvi materialov v razpredelnici so vsi debelozrnati materiali, ki vsebujejo do 5 m.-% zrn velikosti do 0,063 mm, neobčutljivi na zmrzovanje.

Razvrstitev materialov na osnovi občutljivosti na zmrzovanje (Vir: TSC 06.512: 2003, 2003)

Razred	Občutljivost	Delež zrn do 0,063 mm (m.-%)	Klasifikacija
F1	Neobčutljiv	$< 5$	GW, GP SW, SP
F2	Malo do srednje občutljiv	5 ... 15	GC, GM SC, SM CL, CH
F3	Zelo občutljiv	$> 15$	SM – ML ML, MH CL - ML

## 4 EKSPERIMENTALNI PROGRAM

### 4.1 Materiali v eksperimentu

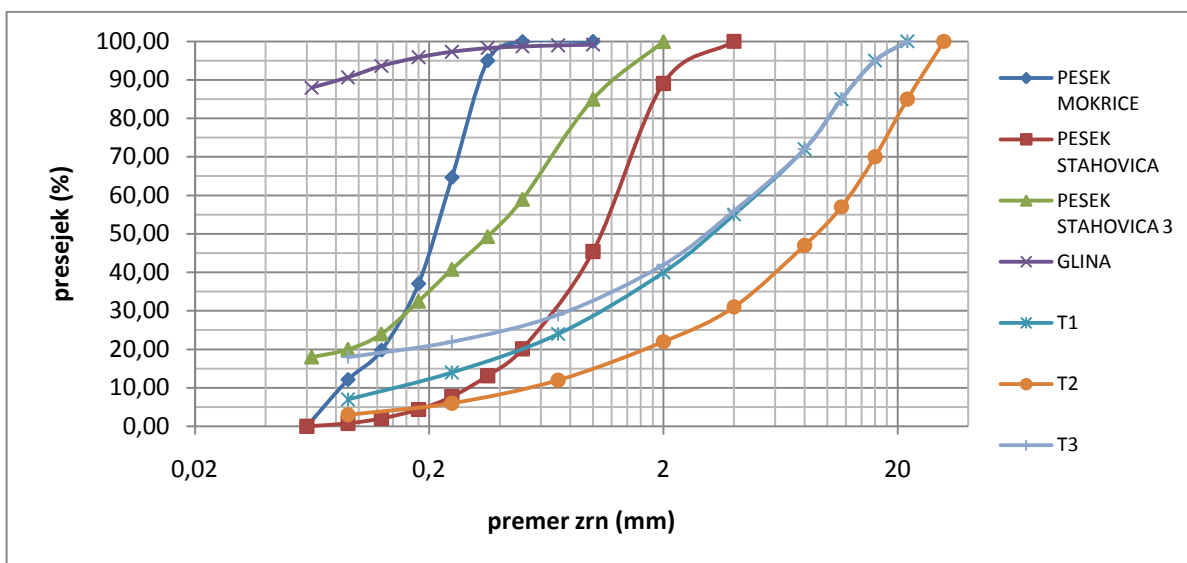
Raziskali smo 6 vrst materialov, katerih lastnosti so prikazane v preglednici 4.1 in 4.2, ter na sliki 4.1 in v preglednici 4.3. Nevezane nosilne plasti v raziskavi se v nadaljevanju pišejo z okrajšavo "NNP".

Preglednica 4.1: Materiali in njihova nahajališča

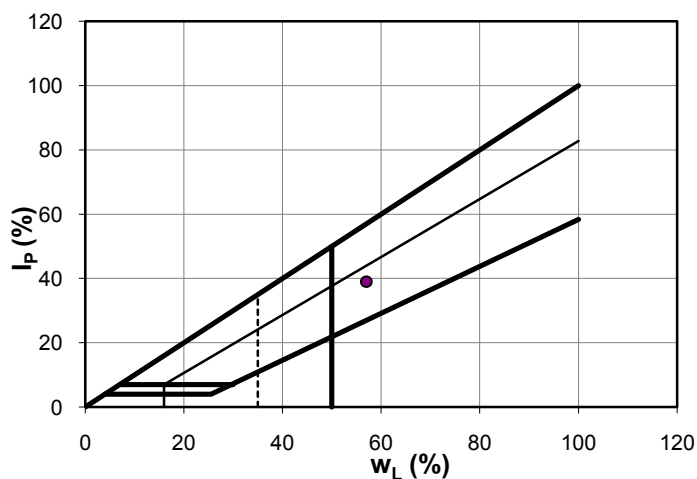
Vzorec	Nahajališče
Glina Boršt, (CH)	Jalovišče Boršt
Kamena moka, (ML)	Kamnolom Stahovica
Pesek Mokrice, (SP)	Hidroelektrarna Mokrice
Pesek Stahovica 3, (SM)	Kamnolom Stahovica
Pesek Stahovica, (SW)	Kamnolom Stahovica
NNP T1 0/22 mm in T2 0/32 mm, (GW)	Kamnolom Stahovica
NNP T3, 0/22 mm, (GM)	Kamnolom Stahovica

Preglednica 4.2: Materiali v raziskavi in njihove karakteristike

Vzorec	$Q_s$ (t/m <sup>3</sup> )	$Q_d \text{ max}$ (t/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$w_A$ (%)	$MB$ (g/kg)
Glina Boršt, (CH)	2,73	1,68	20,1	73,0	43,7
Kamena moka, (ML)	2,72	1,76	15,9	33,0	2,0
Pesek Mokrice, (SP)	2,73	1,66	14,6	35,0	2,0
Pesek Stahovica 3, (SM)	2,72	1,97	9,2	/	0,25
Pesek Stahovica, (SW)	2,72	1,77	2,1	/	0,25
NNP T1 0/22 mm in T2 0/32 mm, (GW)	/	/	/	/	/
NNP T3, 0/22 mm, (GM)	/	/	/	/	/



Slika 4.1: Krivulje zrnivosti materialov v raziskavi



Slika 4.2: Meja židkosti  $w_L$  (%) in indeks plastičnosti  $I_P$  (%) gline Boršt

Preglednica 4.3: Lezne meje gline Boršt na zrnih manjših od 0,063 mm

Naravna vlažnost $w_0$ (%)	18,2
Meja židkosti $w_L$ (%)	57,0
Meja plastičnosti $w_P$ (%)	18,0
Meja krčenja $w_S$ (%)	15,0
Indeks plastičnosti $I_P$ (%)	39,0
Indeks konsistence $I_C$ (%)	1,00

Indeks konsistence ( $I_C$ ) in opis konsistenčnega stanja:

$I_C < 0$  ... židko konsistenčno stanje

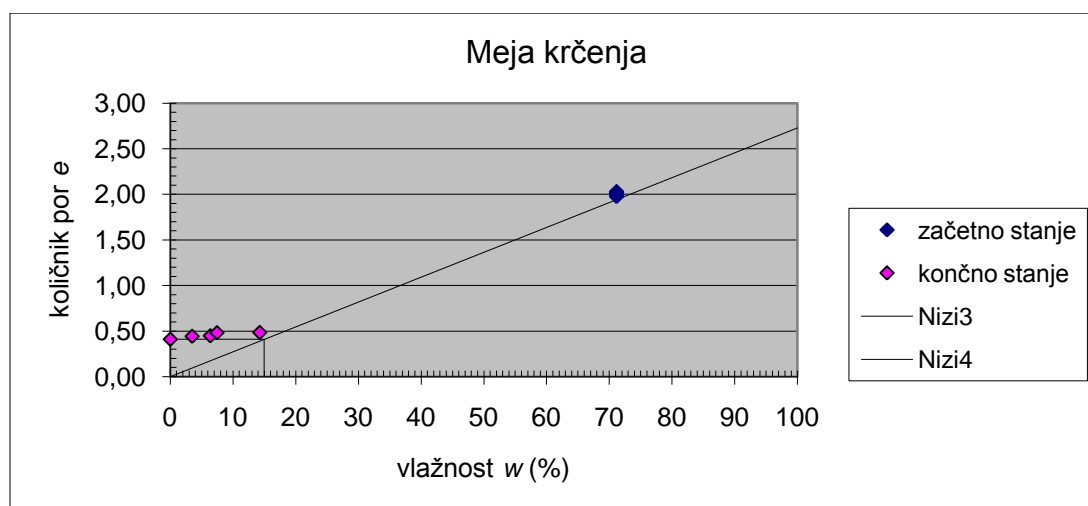
$0 < I_C < 0,33$  ... lahko gnetno konsistenčno stanje

$0,33 < I_C < 0,66$  ... srednje gnetno konsistenčno stanje

$0,66 < I_C < 1$  ... težko gnetno konsistenčno stanje

$I_C > 1$  ... poltrdno konsistenčno stanje

Indeks konsistence ( $I_C$ ) gline Boršt = 1,00 ... glina je na meji med gnetno (plastično) in poltrdno konsistenco



Slika 4.3: Meja krčenja gline Boršt na zrnih manjših od 0,063 mm

## **4.2 Opis eksperimenta**

Raziskave, ki sem jih opravil so obsegale standardne in nestandardne, napredne preiskave. Glavne značilnosti materialov so ugotovljene s standardnimi preiskavami, raziskave volumskih deformacij pri zmrzovanju in tajanju pa so opravljene z nestandardnimi, naprednimi preiskavami.

### **4.2.1 Standardne preiskave**

Po standardih sem opravil naslednje preiskave:

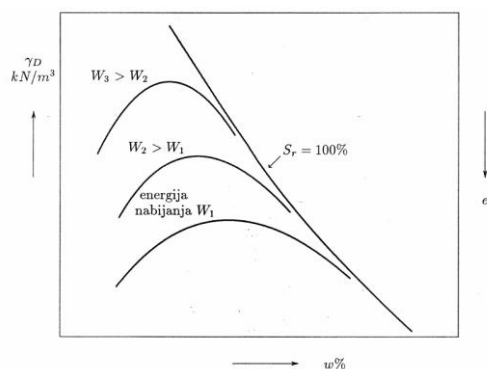
- Ugotavljanje zrnastostne sestave - sejalna preiskava (SIST/ISO/TS 17892-4:2004)
- Ugotavljanje gostote zrn – metoda s piknometrom (SIST/ISO/TS 17892-3:2004)
- Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti (SIST/ISO/TS 17892-12:2004)
- Proctorjev preskus (DIN 18127)
- Vpijanje vode po Enslin Neff metodi (DIN 18132: 1995-12)
- Metilen modro test (EN 933-9)
- Ugotavljanje meje krčenja (ASTM D 4943-02)
- Sukcija zemljin

V naslednjih točkah je kratek opis standardnih preiskav, katere so opravljene po tujih standardih.

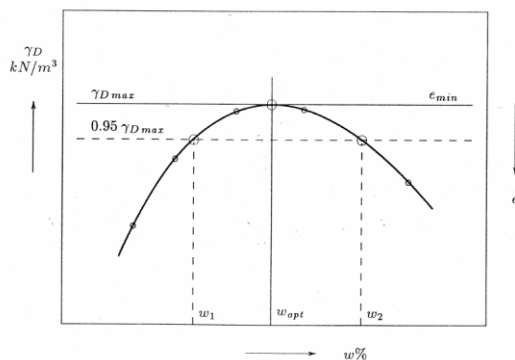
#### **4.2.1.1 Proctorjev preskus (DIN 18127)**

Prostorninska gostota po Proctorju je pri preizkusu po Proctorjevem postopku dosegljiva največja gostota suhega materiala. Sposobnost zgoščevanja zemljin pri neki energiji je odvisna od vlažnosti zemljine.

Proctorjev preizkus je namenjen določitvi optimalne vlažnosti zemljine za vgradnjo. Iščemo torej določeno vlažnost zemljine, pri kateri jo je možno z izbrano energijo najbolje zgotiti.



Odvisnost med  $w$ ,  $\gamma_d$  in energijo  $W$  (Vir: [www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva](http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva), 14.7.2010)



Proctorjeva krivulja (Vir: [www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva](http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva), 14.7.2010)



Slika 4.4: Naprava za Proctorjev preskus

#### **4.2.1.2 Določanje vpijanja vode po Enslin – Neff metodi (DIN 18132: 1995-12)**

Vpijanje vode je ena od najbolj značilnih lastnosti drobnozrnatih zemljin. Odvisna je od specifične površine delcev in njihove aktivnosti delcev. Ker sta specifična površina in aktivnost neposredno odvisni od mineralne sestave zrn, je vpijanje vode že hkrati tudi kazalnik mineralne sestave zemljin. Rezultat preiskave je nespremenljiva vrednost  $w_A$  (%). Sposobnost vpijanja vode  $w_A$  (%) je razmerje med maso vode, ki jo je adsorbiral vzorec suhe zemljine znane mase in maso suhe zemljine, podana v odstotkih.

Preizkus poteka tako, da 1,000 g suhega materiala stresem skozi lijak v napravo in istočasno vključim štoparico. Vmes delam odčitke po intervalih 0 sec, 15 sec, 30 sec, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 45 min, vse dokler se ne ustavi vpijanje vode materiala. Sproti na skali odčitam koliko ml vode material vpije v določenem časovnem intervalu. Rezultate vrišemo na diagram v logaritemskem merilu, v katerem nanašamo delež adsorbirane vode (linearno merilo) v odvisnosti od časa.

#### **4.2.1.3 Metilen modro test (EN 933-9)**

Pri preizkusu metilen modro se določa adsorpcijska sposobnost zrn z merjenjem količine modrega organskega barvila metilen modro, ki je potrebna, da prekrije površine aktivnih glinenih ali drugih finih delcev, ki imajo nabite površine in sposobnost ionske izmenjave. Višja vrednost metilen modro pomeni več aktivnih, ali bolj aktivnih zrn v zmesi zrn. Metoda ne določi vrste glinenih mineralov, ampak le njihovo skupno aktivnost. Postopek poteka tako, da material predhodno posušimo. Pripravimo 10,0 g/L metilen modro raztopine. V stekleno čašo stresemo vzorec in dolijemo 500,0 ml destilirane vode. Z električnim mešalnikom mešamo 5 minut. Začnemo s preiskavo, kjer v čašo z vzorcem in destilirano vodo dodamo 5,0 ml metilen modro raztopine in mešamo 1 minuto.

Po minuti mešanja s kapalko kanemo kapljico (točko premera 8 – 12 mm) na filter papir. Pogledamo točko in v kolikor se okoli točke ne pojavi rob svetlejše modre barve širine 1 mm, ponavljamo postopek. Ko se pojavi omenjeni rob, mešamo raztopino brez dodajanja metilen modro še 4 minute in vsako minuto naredimo odčitek. Če rob v 4 minutah izgine, dodamo še 5,0 ml metilen modro in ponovimo zgornji postopek, če izgine v peti minuti dodamo 2,0 ml. Če rob po 5 minutah ne izgine, je to vrednost metilen modro.



#### 4.2.1.4 Ugotavljanje meje krčenja (ASTM D 4943-02)

Meja krčenja je vlažnost, pod katero se zemljina ob sušenju ne krči več. Prostornina ostaja nespremenljiva. Preiskava je opravljena po metodi ameriškega standarda (ASTM – Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Wax Method).

#### 4.2.1.5 Preiskava sukcije zemljin

Voda, ki se nahaja v tleh skoraj nikoli ni v mirujočem stanju, temveč se giblje v obliki vodne pare ali kot tekočina. Voda kot tekočina se premika s točke kjer so sile vezanja vode manjše, proti točki kjer so sile vezanja vode večje. V homogenih tleh to pomeni, da se voda premika z bolj vlažnega proti bolj suhemu mestu. Med delci zemljine in molekulami vode delujejo privlačne sile, ki jih izrazimo z negativnimi pornimi tlaki. Sila, ki jih opisuje se imenuje sukcija. Več je vode v tleh, z manjšimi silami je vezana na delce. Grafični prikaz razmerja med silo vode s katero je vezana v zemljini in vlažnostjo zemljine, se imenuje retenzijska krivulja. Sukcija je odvisna od stopnje saturacije in vlažnosti zemljine. Če silo s katero je voda vezana izrazimo z višino vodnega stolpca v centimetrih se potem takšna krivulja imenuje  $pF$  krivulja. Na primer  $1,0 \text{ kPa} = 10,0 \text{ cm}$ , kar pomeni, da se pesek navlaži 10,0 cm. Vrednost  $pF$  pomeni negativni logaritem višine vodnega stolpca.

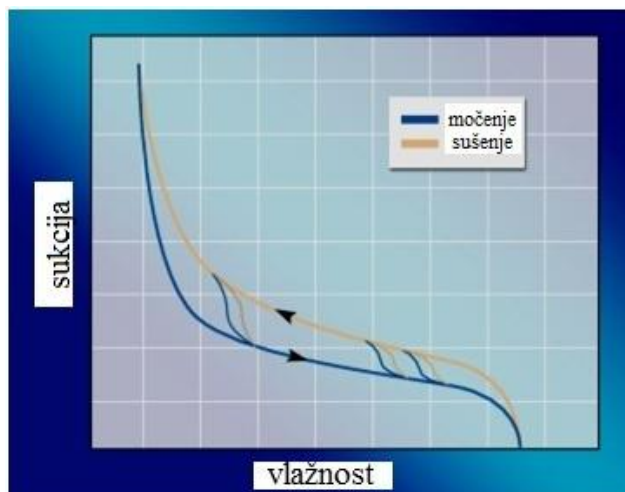
Sukcija vpliva na trdnostne karakteristike. Zaradi sukcije se vzorci sušijo, kar ima za posledico njihovo krčenje. Na primer, razpad fliša je posledica upada sukcije.

Pesek ima majhno sposobnost za zadrževanje vode, zato so peščena tla ponavadi suha. Melj omogoča kapilarni dvig vode, ne nabreka in ni plastičen. Glina ima večjo sposobnost za zadrževanje vode, zato so glinasta tla ponavadi vlažna in neprezračevana, tudi gosta in slabo prepustna.

Za potrebe diplomske naloge, smo meritve sukcije opravili v laboratoriju na Katedri za mehaniko tal UL FGG s posebno opremo HYPROP in Dewpoint Potentiometer WP4 – T.

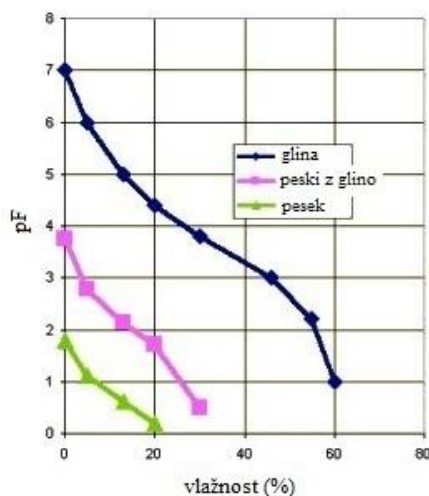
#### 4.2.1.5.1 Retenzijska krivulja

Krivulja, ki prikazuje razmerje med vlažnostjo zemljine in sukcijo zemljine, se imenuje retenzijska krivulja. Točka rezidualne vlage je točka, pri katerem je voda v zemljini vezana le na površino zrna, kar pa omogoča adsorpcijska sposobnost zrna.

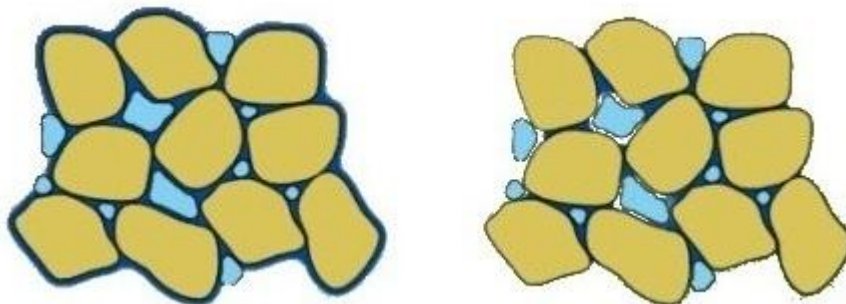


Retenzijska krivulja (Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)

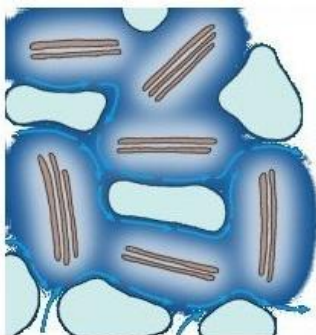
Bolj kot je zemljina fino granulirana, večje so interakcijske sile zemljina – voda. To pomeni, da imajo v enakih pogojih vlažne gline, precej višje vrednosti sukcije v primerjavi s peski. Značilne retenzijske krivulje za različne zemljine so prikazane na spodnji sliki.



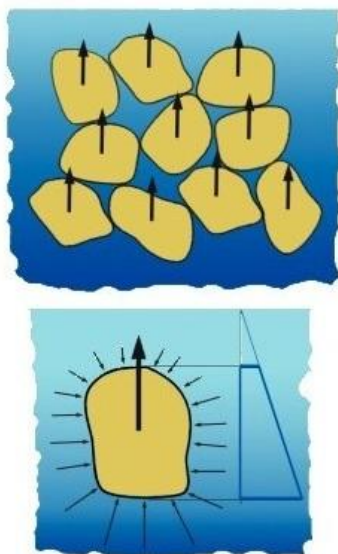
Karakteristične retenzijske krivulje za različne zemljine (Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)



Shematski prikaz gibanja vode v nesaturiranih zemljinah (Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)

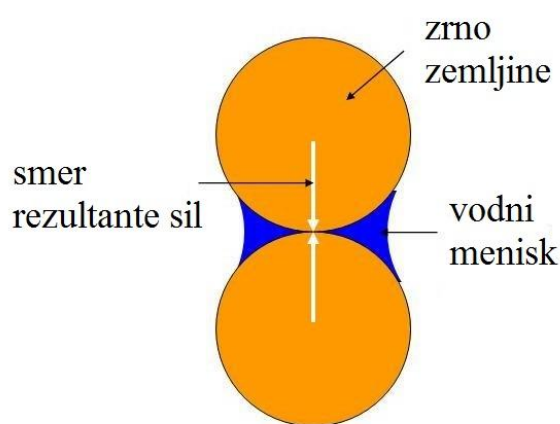


Shematski prikaz gibanja vode v saturirani koherentni zemljini  
(Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)



Sile vodnega tlaka v saturiranem vzorcu (Vir: <http://echo2.epfl.ch/>, 14.7.2010)

Negativni porni tlaki so torej specifični za nesaturirane zemljine, kjer se razvijejo zelo močne interakcijske sile med vodo in delci zemljine. V nekoherentnih zemljinah kot so peski in gramozi, se te sile opisujejo z adsorpcijskim in kapilarnim fenomenom. V koherentnih zemljinah kot so gline in nekateri melji, je narava interakcije bolj kompleksna, vključujoč notranje kemične povezave. Vse omenjene sile so znane kot interakcijske sile zemljina – voda in njihova intenzivnost se prikaže s sukcijsko zemljin.



Vodni menisk in smer rezultante sil med zrnoma zemljine

(Vir: <http://www.geo-observations.com/>, 02.7.2010)

## 4.2.2 Nestandardne preiskave zmrzovanja in tajanja zemljin

### 4.2.2.1 Ciklično zmrzovanje in tajanje zemljin

#### 4.2.2.1.1 Priprava vzorcev

Preglednica 4.4: Vzorci zemljin pri cikličnem zmrzovanju in tajanju

Vzorec	$w_{zač}$ (%)	Okrajšava vzorca	Način vgradnje vzorca v valj za zmrzovanje
Glina Boršt	25	BORŠT	Zbit po SPP
Kamena moka	13	KM 13%	Zbit po SPP
Kamena moka	16	KM 16%	Zbit po SPP
Kamena moka	21	KM 21%	Zbit po SPP
Pesek Mokrice	15	M 15%	Zbit po SPP
Pesek Mokrice	19	M 19%	Zbit po SPP
Pesek Stahovica 3	3	S3 3%	Zbit po SPP
Pesek Stahovica 3	9	S3 9%	Zbit po SPP
Pesek Stahovica	10	S 10%	Zbit po SPP
Pesek Stahovica	18	S 18%	Zbit po SPP

Vsi vzorci zemljin so vgrajeni v jeklene valje enakih dimenzij tako, da so zbiti po standardnem Proctorjevem preskusu pri vnaprej določenih vlagah. Na dnu vzorcev so nato vgrajene keramične porozne ploščice, zgoraj na vrhu pa jeklene ploščate ploščice. Pred začetkom prvega zmrzovanja, so bili vzorci postavljeni v posodo z manjšim nivojem vode za približno 24 ur, da se v tem času lahko enakomerno saturirajo.

Stehtane so bile njihove mase pred in po saturaciji. Vzorci so označeni po imenu in vlagah pri katerih so zbiti. V celoti so toplotno izolirani z bočne in spodnje strani, tako da je zagotovljeno enodimenzijsko zmrzovanje samo z zgornje strani. Vsak vzorec v valju smo izolirali okoli bočne strani s penastim trakom.

Na spodnji strani je za izolacijo uporabljena stiroporna plošča debeline 5,0 cm. Vmesne votle prostore med vzorcih v valjih se je za potrebe izolacije zapolnilo s penjenimi stiropornimi kroglicami.



Slika 4.5: Pripravljene vzorce za preizkus cikličnega zmrzovanja in tavanja



Slika 4.6: Prikaz toplotne izolacije vzorcev

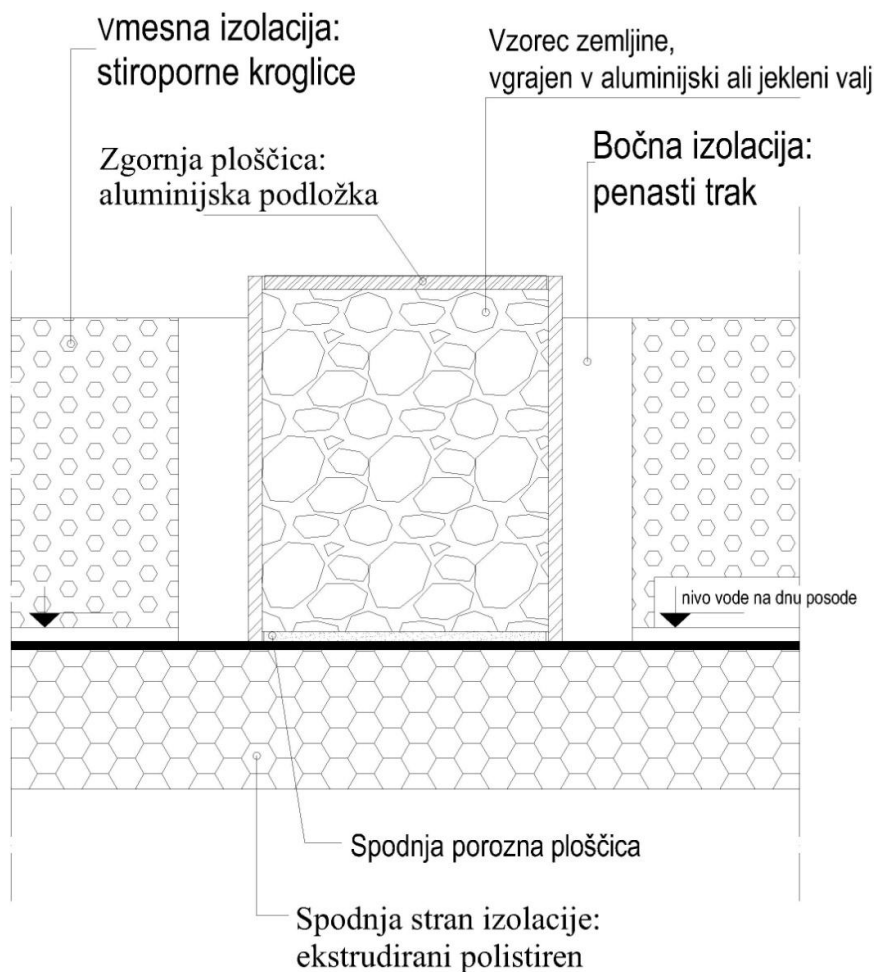
#### 4.2.2.1.2 Metoda zmrzovanja in tajanja

Raziskovali smo enodimenzijski ciklični sistem zmrzovanja in tajanja zemljin. V pokrajinah, kjer se pojav sezonskega zmrzovanja in tajanja ciklično ponavlja, se zemljine zmrzujejo in tajajo samo z zgornje strani, kar povzroča, da imamo samo enosno vertikalno deformacijo zaradi vpliva zmrzovanja in tajanja.

Od samega začetka preiskave, je po vsakem ciklu zmrzovanja in tajanja sproti opravljena meritev in beleženje vertikalne deformacije na vzorcih, ter spremljanje in beleženje spremenjenih mas vzorcev.

Vzorci so za preiskavo zmrzovanja postavljeni na ravno podlago tako, da je na dnu vedno zagotovljen manjši nivo vode med zmrzovanjem in tajanjem, kar omogoča vzorcem kapilarni dvig ves čas med preiskavo. Vzorci so se zmrzovali samo od zgoraj navzdol. Temperatura pri kateri so se vzorci zmrzovali v zamrzovalniku je bila med  $-15,0$  in  $-19,0$  °C. Vzorci so se odtajali na temperaturi okoli  $27,0$  °C. Odčitki deformacij so narejeni po ciklih, na začetku po enkrat dnevno v dopoldanskem času. Vsak cikel zmrzovanja in tajanja traja približno 24 ur, razen ob vikendih, kadar je cikel zmrzovanja ali tajanja med petkom in ponedeljkom trajal približno 72 ur. Z merilno napravo, ki ima natančnost 1,00 mm, se po vsakem ciklu izmeri in zabeleži odčitek na skali, iz katerega se ugotovi vertikalna deformacija. Meritve so potekale tako, da se vzorec vzame ven in se merilno tipalo postavi in centrira na zgornjo ploščico vzorca, ter se takoj naredi odčitek na merilni urici. Po vsakem ciklu zmrzovanja in tajanja se vzorce tudi znova stehta in sproti zabeleži spremenjeno maso. Iz pridobljenih meritev, se izračuna trenutno vlažnost in stopnjo saturacije vzorca pri določenem ciklu, spreminjanje suhe gostote pri zmrzovanju ali tajanju, zmrzlinški dvižek trenutnega cikla zmrzovanja in posedek vzorca pri tajanju. Vzorce se pri vsakem merjenju vizualno pregleda in če so vidne večje spremembe na kateremu od vzorcev se tudi fotografira. Kadar se je za katerega od vzorcev končala serija ciklov zmrzovanja in tajanja, se je po tem, ko se ga je dalo ven iz preiskave vzorec stehtalo, določilo vlažnost vzorca in se ga fotografiralo. Vzorci so bili v preiskavi zmrzovanja in tajanja do trenutka, ko so se deformacije stabilizirale in se niso več dogajale večje spremembe.

Preizkus zmrzovanja in tajanja na vzorcih je trajal 38 dni, največ je bilo opravljenih na vzorcih 12 zaporednih ciklov zmrzovanja in tajanja.



Slika 4.7: Prečni prerez cikličnega zmrzovanja in tavanja vzorca zemljine

dimenzija valja za zmrzovanje zemljin:	$d_{valja} = 102,3 \text{ mm}, h_{valja} = 131,0 \text{ mm}$
dimenzija zgornje in spodnje ploščice:	$h_{ploščic} = 7,500 \text{ mm}$
dimenzija podložke:	$h_{podložka} = 2,930 \text{ mm}$
umeritev začetne nastavitve na merilni urici:	$z_0 = 3,523 \text{ mm}$
temperatura zmrzovanja in tavanja:	$T = - 19,0 \text{ °C do } + 27,0 \text{ °C}$
trajanje 1 cikla zmrzovanja in tavanja:	$t = \text{min. } 24 \text{ ur do maks. } 72 \text{ ur}$
skupno trajanje cikličnega zmrzovanja in tavanja:	$t = 38 \text{ dni (12 zaporednih ciklov)}$
kapilarni dvig:	omogočen ves čas med preiskavo



Dodatne vertikalne obtežbe na vzorcih med zmrzovanjem in tajanjem ni bilo. Na spremembo višine vzorca med tajanjem tako vpliva le lastna teža vzorca.



Slika 4.8: Merjenje deformacij na vzorcu pri cikličnem zmrzovanju



Slika 4.9: Vzorci med preiskavo cikličnega zmrzovanja in tajanja

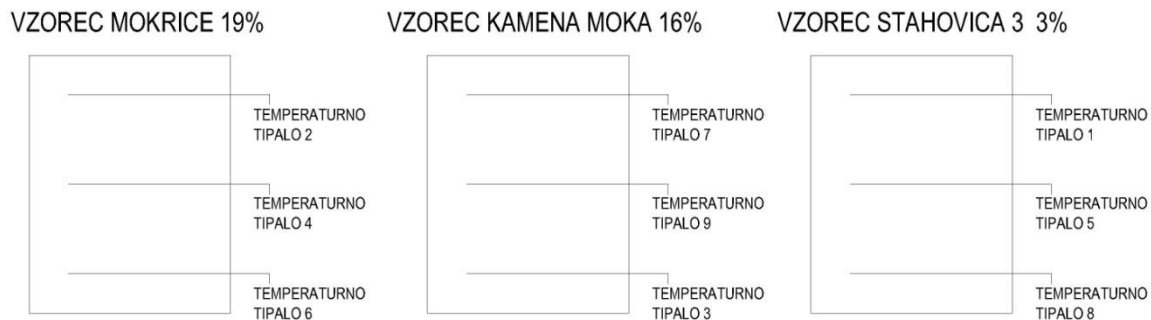
#### 4.2.2.2 Odprti sistem zmrzovanja in tajanja zemljin

##### 4.2.2.2.1 Priprava vzorcev

Preglednica 4.5: Vzorci zemljin pri odprtem sistemu zmrzovanja

Vzorec	$w_{zač.}$ vzorca (%)	Okrajšava vzorca	Način vgradnje vzorca v valj za zmrzovanje	Vgradnja temperaturnih tipal (oznaka tipala)
Glina Boršt	25	BORŠT	Zbit po SPP*	/
Kamena moka	13	KM13	Zbit po SPP*	/
Kamena moka	16	KM16	Zbit po SPP*	Tipalo št.: 7, 9, 3.
Pesek Mokrice	15	M15	Zbit po SPP*	/
Pesek Mokrice	19	M19	Zbit po SPP*	Tipalo št.: 2, 4, 6.
Pesek Stahovica 3	3	S3 3%	Zbit po SPP*	Tipalo št.: 1, 5, 8.
Pesek Stahovica 3	9	S3 9%	Zbit po SPP*	/
Pesek Stahovica	10	S10	Zbit po SPP*	/
Pesek Stahovica	18	S18	Zbit po SPP*	/
NNP 1	5	T1	Zbit po MPP*	/
NNP 2	5	T2	Zbit po MPP*	/
NNP 3	7	T3	Zbit po MPP*	/

\* Ker smo v tem primeru imeli vzorce manjših višin, se za volumen valja posledično vzame namesto prejšnjih  $942,0 \text{ cm}^3$  novih  $824,0 \text{ cm}^3$ , kar se pa linearno preračuna v SPP na 3 x po 22 udarcev in v MPP na 1 x 36 udarcev in 2 x 37 udarcev.



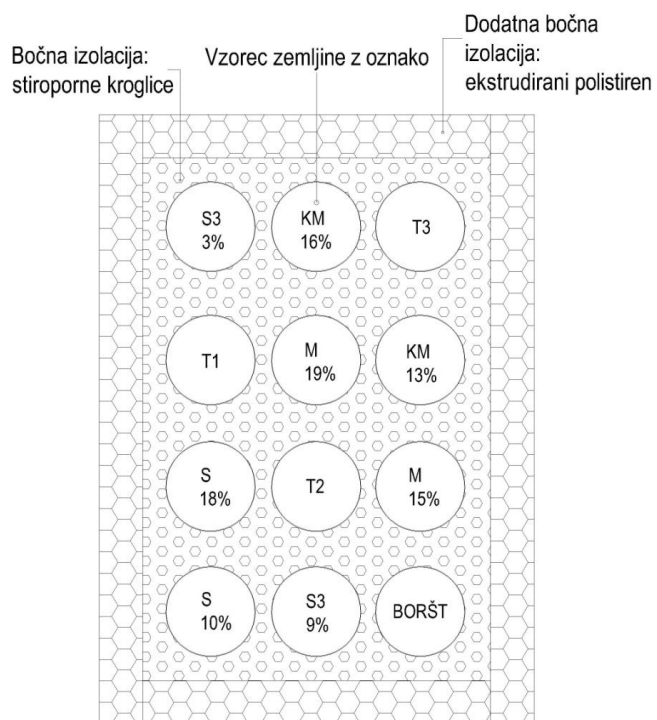
Slika 4.10: Shematski prikaz razporeditve temperaturnih tipal v vzorcih

#### 4.2.2.2 Metoda zmrzovanja in tajanja

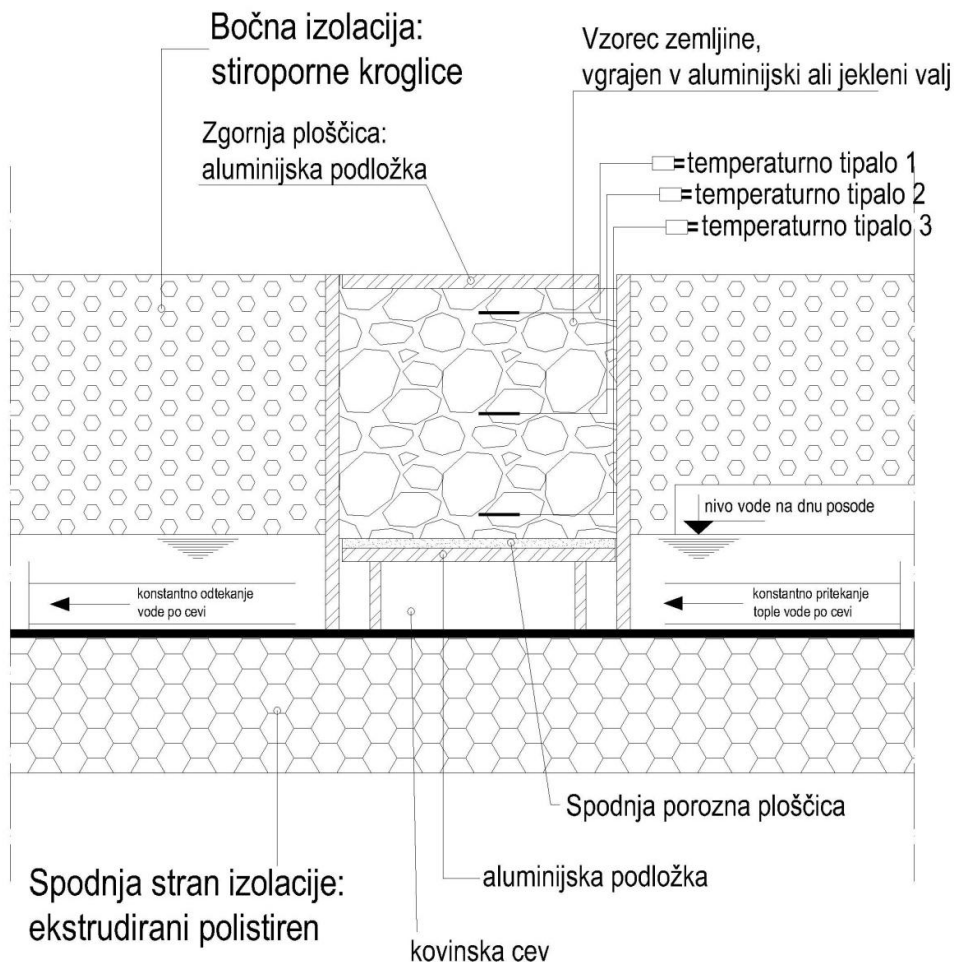
Preiskava zmrzovanja je potekala tako, da je v spodnjem delu celoten čas med zmrzovanjem bilo omogočeno neprekinjeno kroženje nezamrznjene vode. Vertikalne deformacije se je sproti merilo s kljunastim merilom, spremembe temperatur na treh vzorcih na treh različnih višinah pa z digitalnim multimetrom. Beležila se je tudi sprememba temperature vode, ki je krožila ves čas preiskave na spodnjem delu vzorcev. Temperaturna tipala so bila vgrajena v valje med zbijanjem vzorcev po standardnem Proctorjevem preskusu, na treh različnih višinah kot je shematsko prikazano na zgornji sliki. Vzorci, na katerih so se opravljale meritve temperature so Mokrice 19%, Kamena moka 16% in Stahovica 3 3%. Preizkus z odprtim sistemom zmrzovanja (z nastajanjem ledenih leč) je skupno trajal 4 dni.



Slika 4.11: Vzorci v zamrzovalniku med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 4.12: Tlorisna postavitev vzorcev med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 4.13: Prečni prerez vzorca med zmrzovanjem z odprtim sistemom

dimenzija kovinskega valja za zmrzovanje zemljin:	$d_{valj, kovinski} = 102,3 \text{ mm}$
dimenzija aluminijskega valja za zmrzovanje zemljin:	$d_{valj, aluminij} = 102,6 \text{ mm}$
višina aluminijskega in kovinskega valja:	$h_{valja} = 131,0 \text{ mm}$
višina cevi za podlago:	$v_{cevi} = 25,0 \text{ mm}$
višina kovinske podložke:	$v_{kov. podl.} = 4,0 \text{ mm}$
višina aluminijske podložke:	$v_{alum. podl.} = 5,0 \text{ mm}$
višina porozne ploščice:	$v_{por. pl.} = 3,5 \text{ mm}$
višina plastične podložne ploščice:	$v_{podl. pl.} = 2,925 \text{ mm}$
trajanje zmrzovanja z odprtim sistemom:	$t = 4 \text{ dni}$
temperatura zmrzovanja:	$T = -19,0 \text{ °C}$



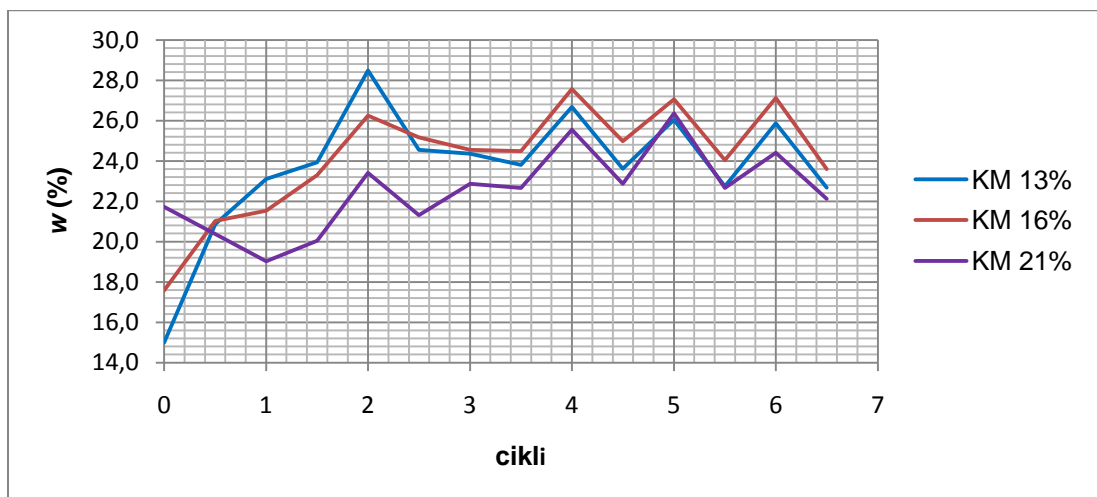
Slika 4.14: Merjenje temperature na treh različnih višinah (slojih) v vzorcu

## 5 REZULTATI EKSPERIMENTA IN RAZPRAVA

### 5.1 Rezultati cikličnega zmrzovanja in tajanja zemljin

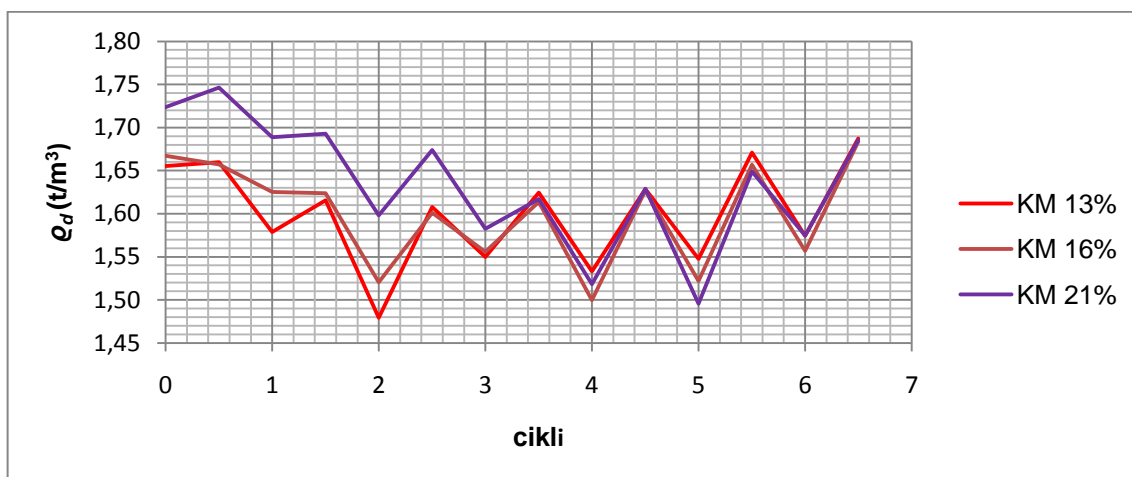
#### 5.1.1 Kamena moka

Na kameni moki je bilo opravljenih 6 zaporednih ciklov zmrzovanja in tajanja. Vsi trije različni vzorci kamene moke, KM 13%, KM 16% in KM 21% so se med preiskavo začeli utekočinjati, kar je povzročilo precejšnje lezenje materiala navzven s spodnje strani valja. Ko smo material iztisnili iz valja je bilo razvidno, da je zgornja stran vzorca razmočena, spodnja stran pa dokaj kompaktna. Opravili smo preiskavo s konusom na zgornji in spodnji strani vzorcev, zaradi same utekočinjenosti materialov pa na vzorcih ni bilo možno opraviti še katero drugo primerno preiskavo, na primer določitve enosne tlačne trdnosti. Vzorce smo nato postavili na sušenje v peč, zaradi kasnejše določitve suhih tež in vlažnosti vzorcev po preiskavi zmrzovanja in tajanja.



Slika 5.1:  $\Delta w$  (%) vzorcev kamene moke med cikličnim preizkusom





Slika 5.2:  $\Delta Q_d$  (t/m<sup>3</sup>) vzorcev kamene moka med cikličnim preizkusom

### 5.1.1.1 Kamena moka 13%

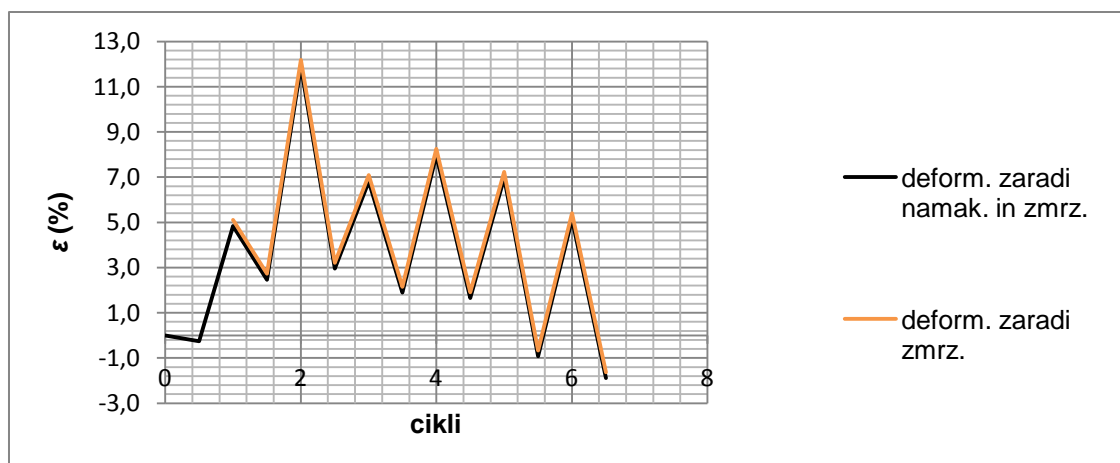


Slika 5.3: KM 13% po končanem cikličnem preizkusu





Slika 5.4: Zunanja in notranja tekstura vzorca KM 13% na koncu raziskave

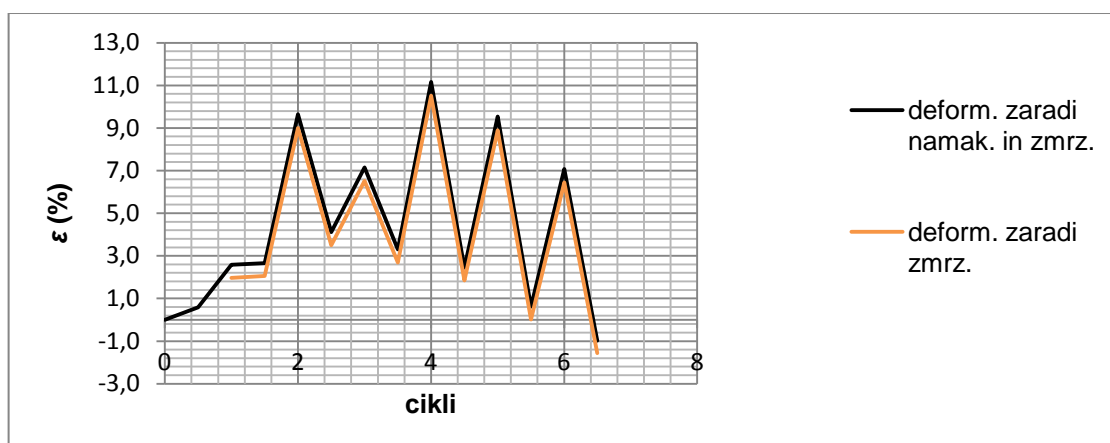
Slika 5.5:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca KM 13% med cikličnim preizkusom

Stopnja zasičenosti je bila ob koncu preiskave 100,0 %, vzorec se je med preiskavo v celoti saturiral. Vlažnost se je do 2. cikla zviševala in nato potekala večinoma konstantno. Na koncu preiskave je bila vlažnost 20,0 %. Suha gostota se je ob koncu preiskave malo zvišala.

### 5.1.1.2 Kamena moka 16%



Slika 5.6: Vzorec KM 16% po končanih raziskavah



Slika 5.7:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca KM 16% med cikličnim preizkusom

Stopnja zasičenosti je bila med večino preiskusa in ob koncu preiskave 100,0 %, vzorec se je med preiskavo popolnoma saturiral. Vlažnost je bila ob koncu preiskave 21,0 %. Suha gostota je bila ob koncu preiskave skoraj nespremenjena.

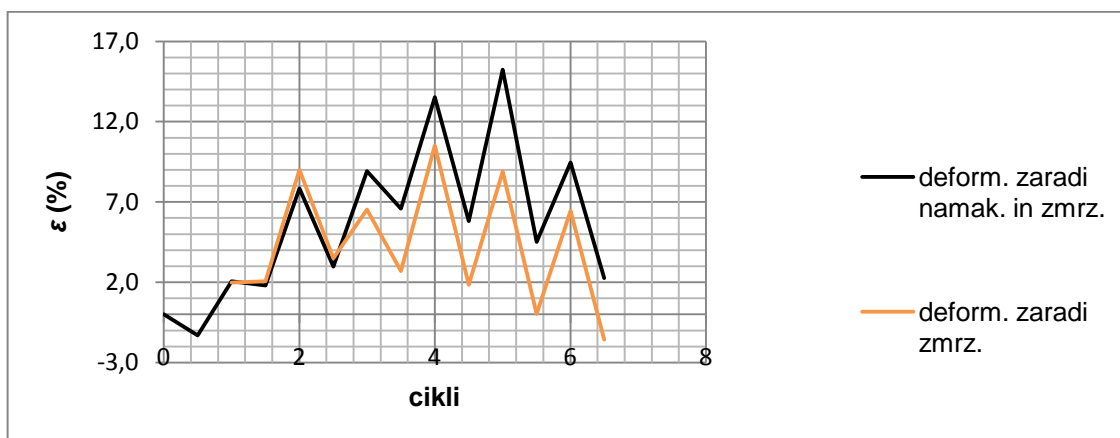
### 5.1.1.3 Kamena moka 21%



Slika 5.8: Vzorec KM 21% po končanih raziskavah



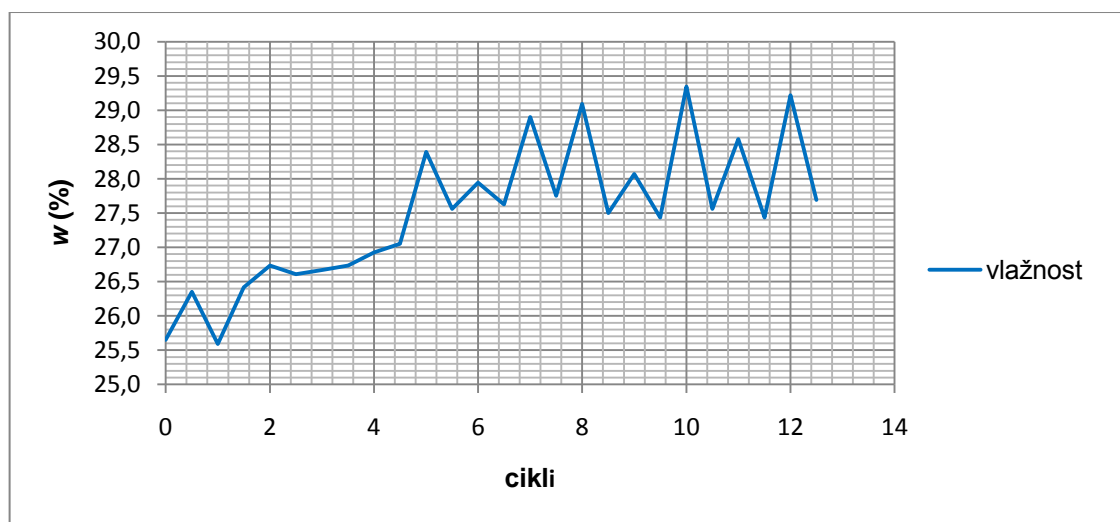
Slika 5.9: Zunanja tekstura vzorca KM 21% po končanih raziskavah



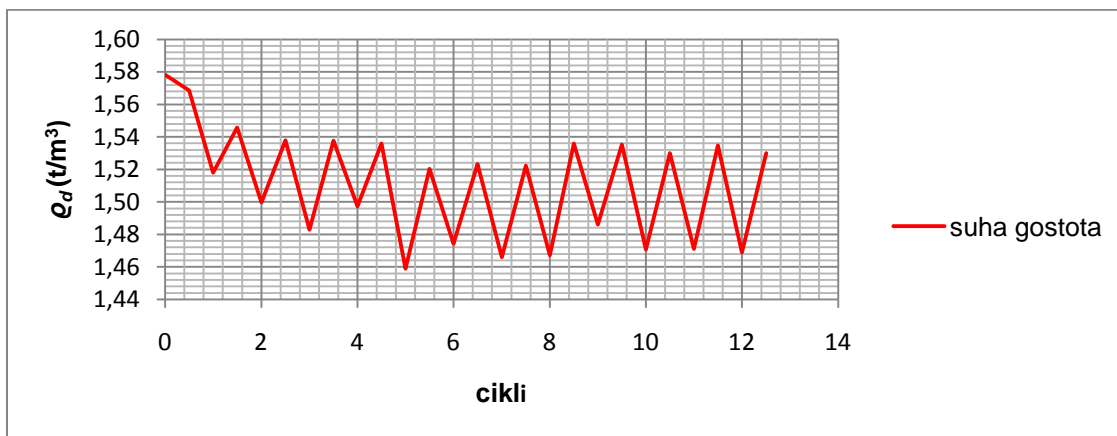
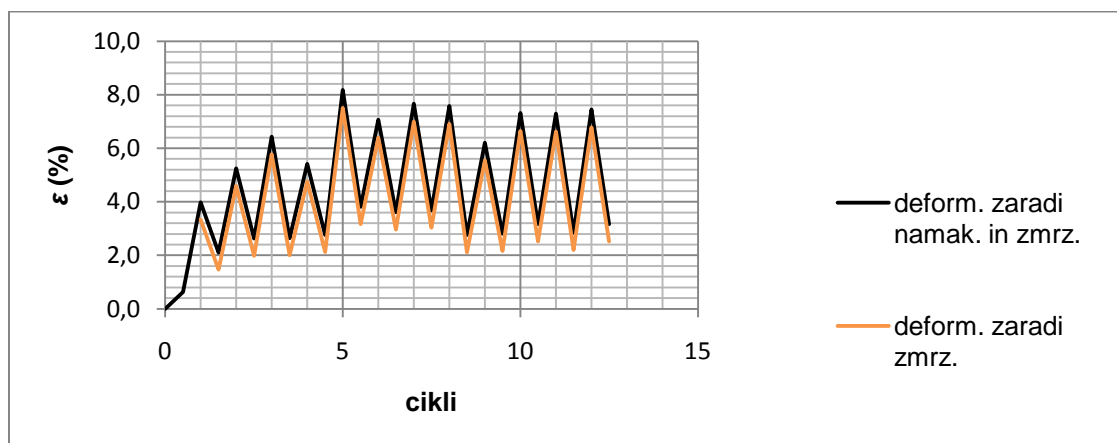
Slika 5.10:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca KM 21% med cikličnim preizkusom

Stopnja zasičenosti je bila med večino preiskusa in ob koncu preiskave malo pod mejo popolne saturacije. Vlažnost je bila ob koncu preiskave 19,5 %. Suha gostota se je med zmrzovanjem in tajanjem zmanjševala in je bila ob koncu preiskave malo manjša kot na začetku.

### 5.1.2 Glina Boršt



Slika 5.11:  $\Delta w$  (%) vzorca Boršt med cikličnim preizkusom

Slika 5.12:  $\Delta \rho_d$  (t/m<sup>3</sup>) vzorca Boršt med cikličnim preizkusomSlika 5.13:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca Boršt med cikličnim preizkusom

Stopnja zasičenosti je bila med večino preiskusa med cikli zmrzovanja 100,0 %. Vlažnost je bila ob koncu preiskave 27,0 %. Suha gostota se je med zmrzovanjem in tajanjem zmanjševala in je bila ob koncu preiskave malo manjša kot na začetku.

Na sliki 5.14 je po obliki deformacije razvidno, da so v vzorcu gline med zmrzovanjem nastajale velike bočne napetosti.



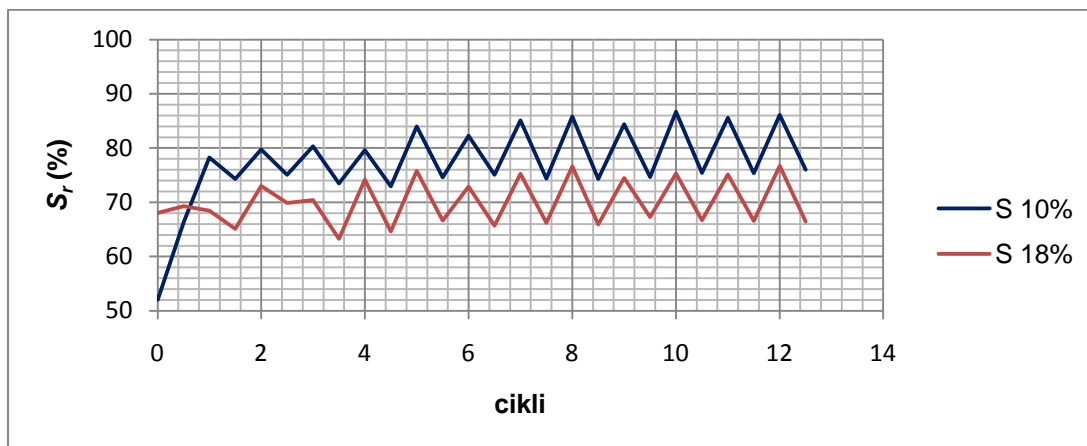


Slika 5.14: Deformacija gline Boršt ob iztiskanju iz valja



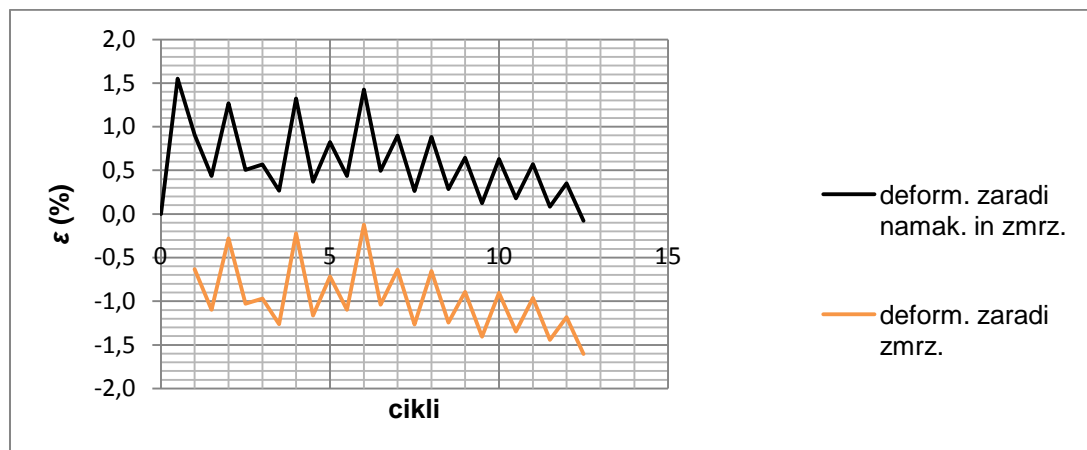
Slika 5.15: Glina Boršt po koncu preiskave cikličnega zmrzovanja in tavanja

### 5.1.3 Pesek Stahovica



Slika 5.16:  $\Delta S_r$  (%) vzorcev pesek Stahovica med cikličnim preizkusom

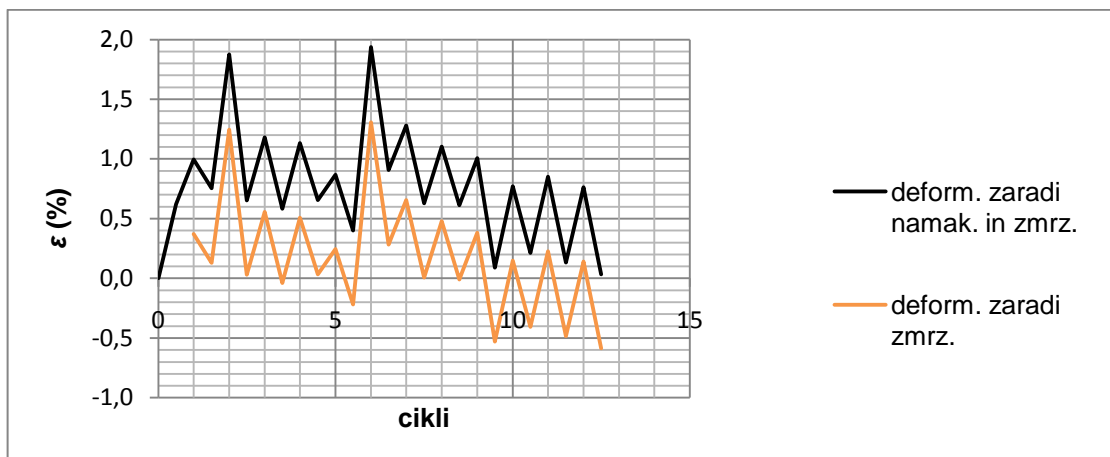
#### 5.1.3.1 Stahovica 10%



Slika 5.17:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca S 10% med cikličnim preizkusom

Saturiranost se je do 5. cikla zmrzovanja povečevala in se nato po ciklih spreminjala približno konstantno. Vlažnost je bila ob koncu preiskave 13,0 %. Suha gostota se je minimalno spreminjala in je bila ob koncu preiskave nespremenjena glede na začetno suho gostoto.

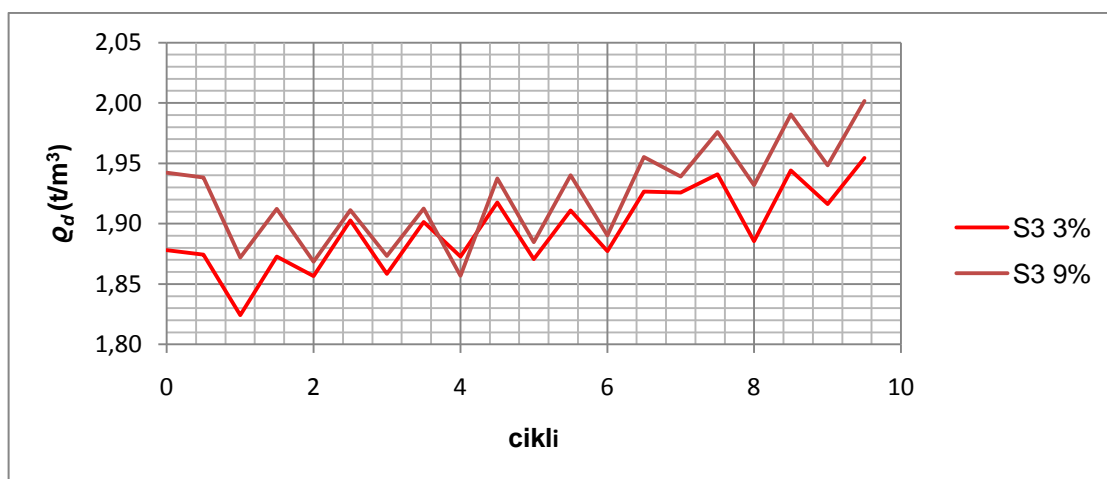
### 5.1.3.2 Stahovica 18%



Slika 5.18:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca S 18% med cikličnim preizkusom

Na koncu preiskave je bil vzorec skoraj enako saturiran kot na začetku. Vlažnost je bila ob koncu preiskave 12,0 %. Suha gostota se je minimalno in enakomerno spreminjala in je bila ob koncu preiskave nespremenjena glede na začetno suho gostoto pred začetkom zmrzovanja in tavanja.

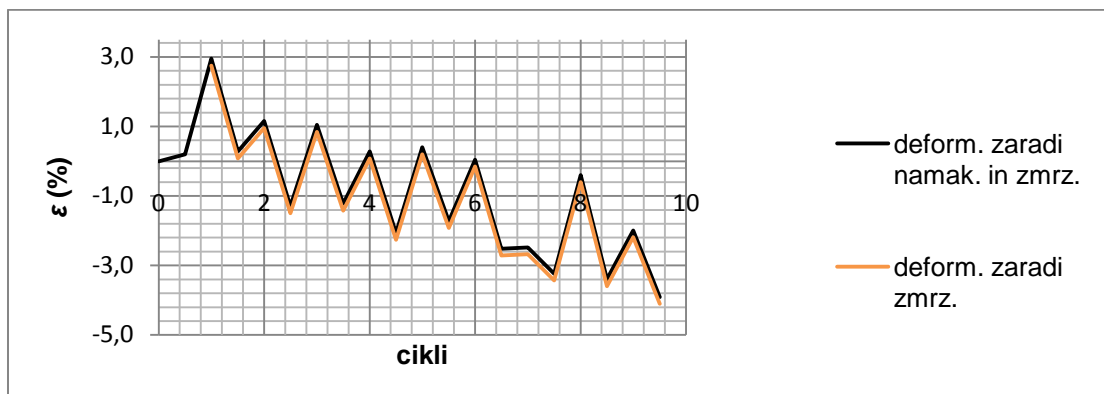
### 5.1.4 Pesek Stahovica 3



Slika 5.19:  $\Delta \rho_d$  (t/m<sup>3</sup>) vzorca S3 med cikličnim preizkusom



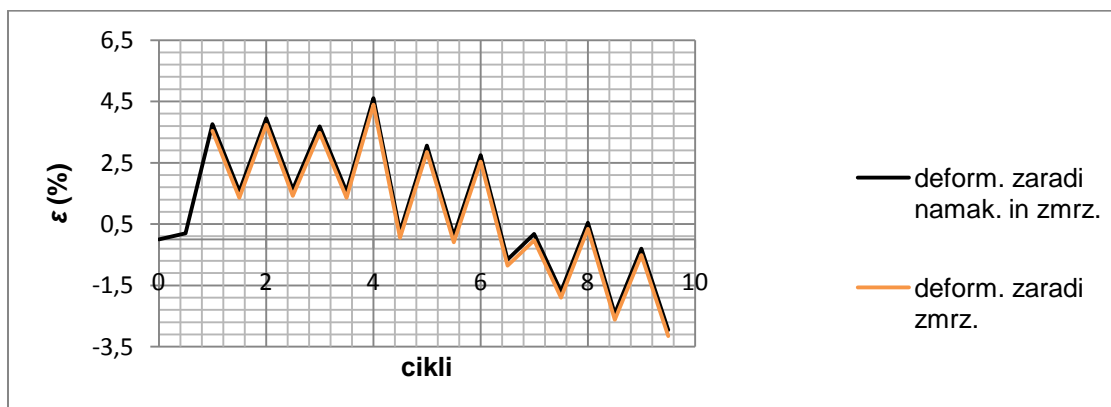
### 5.1.4.1 Stahovica 3 3%



Slika 5.20:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca S3 3% med cikličnim preizkusom

Vzorcu se je naglo povečala stopnja zasičenosti po prvem namakanju. Zaradi nižje začetne vlage je bil verjetno zmožen večje vodovpojnosti. Med zmrzovanjem in tajanjem se je stopnja zasičenosti še malo konstantno povečevala. Suha gostota se je med raziskavo malo povečala.

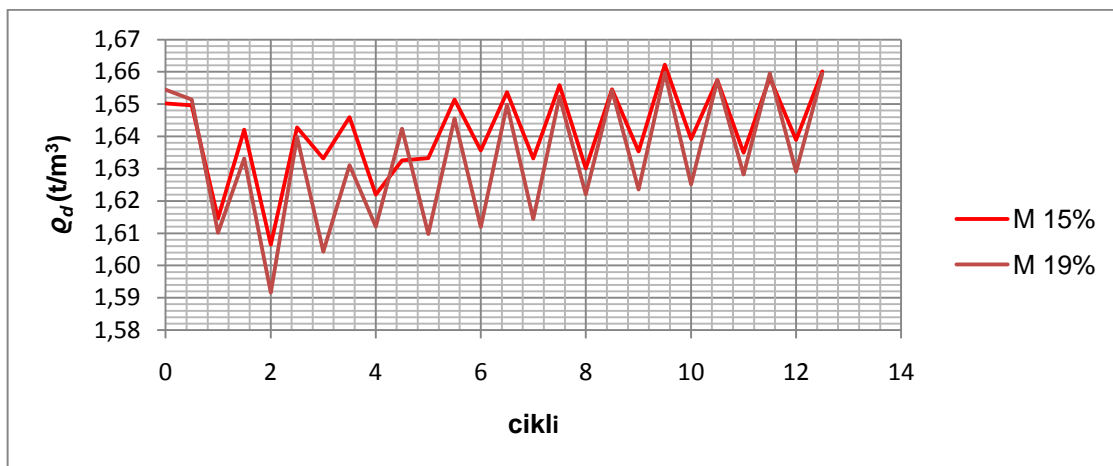
### 5.1.4.2 Stahovica 3 9%



Slika 5.21:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca S3 9% med cikličnim preizkusom

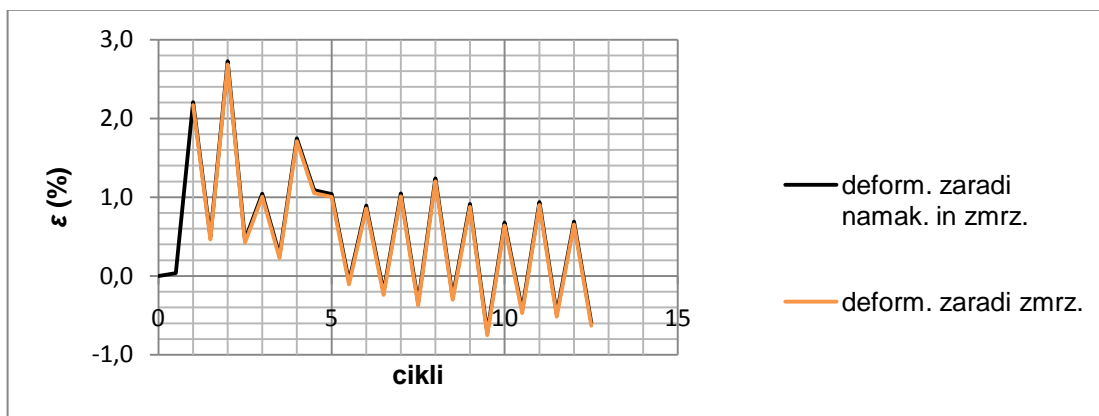
Vzorec se je takoj na začetku zmrzovanja skoraj popolnoma saturiral in po 4. ciklu je imel med zmrzovanjem konstantno 100,0 % zasičenost. Vlažnost je bila ob preiskavi 10,0 %. Suha gostota se je med prvotnimi cikli zmrzovanja in tajanja malo zmanjšala, potem pa se je povečala, tako da je bila ob koncu preizkusa malo večja kot na začetku.

### 5.1.5 Pesek Mokrice



Slika 5.22:  $\Delta Q_d$  (t/m<sup>3</sup>) vzorcev peska Mokrice med cikličnim preizkusom

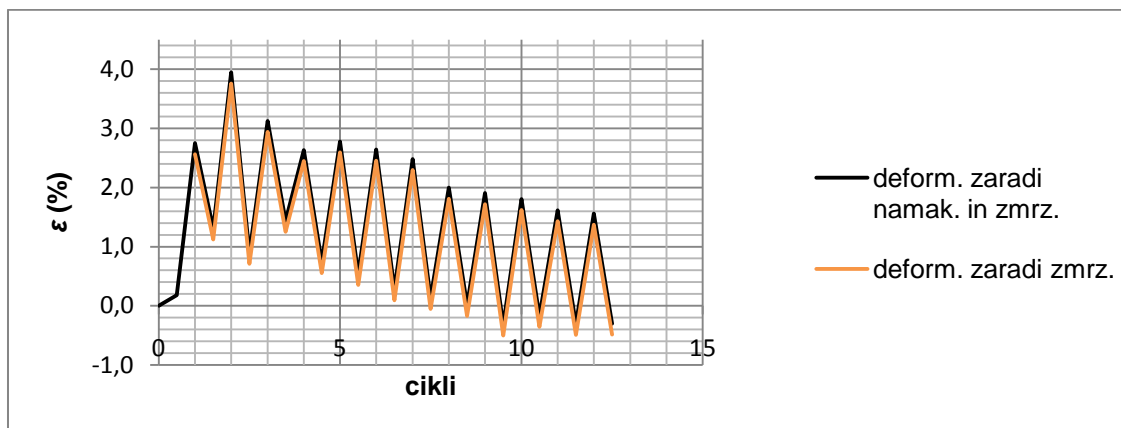
#### 5.1.5.1 Mokrice 15%



Slika 5.23:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca M 15% med cikličnim preizkusom

Vzorcju se je na začetku malo povečala stopnja saturacije, ki je potem potekala večinoma konstantno, ni se pa popolnoma saturiral. Suha gostota se je med preizkusom spreminjala le minimalno, tako da je vzorec ohranil skoraj enako vrednost prvotne suhe gostote.

## 5.1.5.2 Mokrice 19%

Slika 5.24:  $\Delta \varepsilon_{zmrz}$  (%) in  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorca M 19% med cikličnim preizkusom

V vlažnosti in stopnji saturacije se je vzorec obnašal skoraj enako kot M 15%. Suha gostota se je med preizkusom spreminjala le minimalno, tako da je vzorec do konca ohranil skoraj enako vrednost prvotne suhe gostote.

Preglednica 5.1: Volumske deformacije pri cikličnem preizkusu

cikli	Glina		Kamena moka						Pesek Mokrice			Pesek Stahovica 3			Pesek Stahovica					
	BORST		KM 13%		KM 16%		KM 21%		M 15%		M 19%		S3 3%		S3 9%		S 10%		S 18%	
	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)	$\epsilon$ (%)	$H_{\text{vzorca}}$ (mm)
Začetno stanje	0,0	121,1	0,0	117,7	0,0	116,3	0,0	105,0	0,0	114,1	0,0	109,4	0,0	121,4	0,0	121,8	0,0	114,0	0,0	113,7
Po saturaciji	0,6	121,9	-0,3	117,4	0,6	116,9	-1,3	103,6	0,0	114,1	0,2	109,6	0,2	121,6	1,5	122,0	1,5	115,8	0,6	114,4
1. zmrzovanje	4,0	125,9	4,8	123,4	2,6	119,3	2,1	107,1	2,2	116,6	2,8	112,4	3,0	125,0	3,8	126,3	0,9	115,0	1,0	114,8
1. tajanje	2,1	123,6	2,5	120,6	2,7	119,4	1,8	106,9	0,5	114,6	1,3	110,9	0,3	121,7	1,6	123,7	0,4	114,5	0,8	114,6
2. zmrzovanje	5,2	127,4	11,9	131,7	9,6	127,5	7,8	113,2	2,7	117,2	3,9	113,7	1,2	122,8	4,0	126,6	1,3	115,5	1,9	115,8
2. tajanje	2,6	124,3	3,0	121,1	4,1	121,0	3,0	108,1	0,5	114,6	0,9	110,4	-1,3	119,8	1,6	123,8	0,5	114,6	0,7	114,5
3. zmrzovanje	6,4	128,9	6,8	125,7	7,2	124,6	8,9	114,3	1,0	115,2	3,1	112,8	1,0	122,7	3,7	126,3	0,6	114,7	1,2	115,1
3. tajanje	2,6	124,3	1,9	119,9	3,3	120,1	6,6	111,9	0,3	114,4	1,4	111,0	-1,2	119,9	1,6	123,7	0,3	114,3	0,6	114,4
4. zmrzovanje	5,4	127,7	8,0	127,1	11,2	129,2	13,5	119,2	1,7	116,0	2,6	112,3	0,3	121,7	4,6	127,4	1,3	115,5	1,1	115,0
4. tajanje	2,8	124,4	1,6	119,6	2,5	119,1	5,8	111,1	1,1	115,3	0,7	110,2	-2,1	118,9	0,3	122,1	0,4	114,4	0,7	114,5
5. zmrzovanje	8,2	131,0	7,0	125,9	9,5	127,3	15,2	121,0	1,0	115,2	2,8	112,5	0,4	121,9	3,1	125,5	0,8	115,0	0,9	114,7
5. tajanje	3,8	125,7	-0,9	116,6	0,6	117,0	4,5	109,7	-0,1	114,0	0,5	110,0	-1,7	119,3	0,1	121,9	0,4	114,5	0,4	114,2
6. zmrzovanje	7,1	129,6	5,1	123,7	7,1	124,5	9,4	114,9	0,9	115,1	2,6	112,3	0,0	121,5	2,7	125,1	1,4	115,6	1,9	115,9
6. tajanje	3,6	125,5	-1,9	115,4	-1,0	115,1	2,3	107,3	-0,2	113,8	0,3	109,7	-2,5	118,3	-0,7	121,0	0,5	114,6	0,9	114,7
7. zmrzovanje	7,7	130,4	3,7	125,6	3,7	125,6	1,0	115,2	1,0	115,2	2,5	112,1	-2,5	118,4	0,2	122,0	0,9	115,0	1,3	115,2
7. tajanje	3,7	125,6	1,2	119,6	1,2	119,6	1,2	111,1	-0,3	113,7	0,1	109,6	-3,2	117,5	-1,7	119,7	0,3	114,3	0,6	114,4
8. zmrzovanje	7,6	130,3	2,8	124,4	2,8	124,4	1,2	115,5	1,2	115,5	2,0	111,6	-0,4	120,9	0,5	122,4	0,9	115,0	1,1	115,0
8. tajanje	2,8	124,4	0,9	115,1	0,9	115,1	0,9	113,8	-0,3	113,8	0,0	109,4	-3,4	117,3	-2,4	118,8	0,3	114,3	0,6	114,4
9. zmrzovanje	6,2	128,6	2,8	124,5	2,8	124,5	0,7	113,2	-0,7	113,2	1,9	111,5	-2,0	119,0	-0,3	121,4	0,6	114,7	1,0	114,9
9. tajanje	2,8	124,5	0,7	114,8	0,7	114,8	1,8	111,4	0,7	114,8	1,8	111,4	-3,9	116,7	-3,0	118,2	0,1	114,2	0,1	113,8
10. zmrzovanje	7,3	130,0	3,2	124,9	3,2	124,9	0,9	115,1	-0,4	113,6	1,8	111,4	-0,2	109,2	0,6	114,7	0,8	114,7	0,8	114,6
10. tajanje	3,2	124,9	0,9	115,1	0,9	115,1	1,6	111,2	-0,2	113,6	-0,2	109,2	0,2	114,2	0,2	114,2	0,2	114,2	0,2	114,0
11. zmrzovanje	7,3	129,9	2,8	124,5	2,8	124,5	-0,5	113,5	-0,5	113,5	-0,3	109,1	-0,3	109,1	0,1	114,1	0,1	114,1	0,1	113,9
11. tajanje	2,8	124,5	0,7	114,8	0,7	114,8	1,6	111,1	0,7	114,8	1,6	111,1	-0,3	109,1	0,1	114,1	0,1	114,1	0,1	113,9
12. zmrzovanje	7,4	130,1	3,2	124,9	3,2	124,9	-0,6	113,4	-0,6	113,4	-0,3	109,1	-0,1	113,9	-0,1	113,9	-0,1	113,9	0,0	113,7
12. tajanje	3,2	124,9	0,7	114,8	0,7	114,8	1,6	111,1	0,7	114,8	1,6	111,1	-0,3	109,1	0,1	114,1	0,1	114,1	0,1	113,9

Preglednica 5.2:  $\Delta w$  (%) pri cikličnem zmrzovanju in tajanju

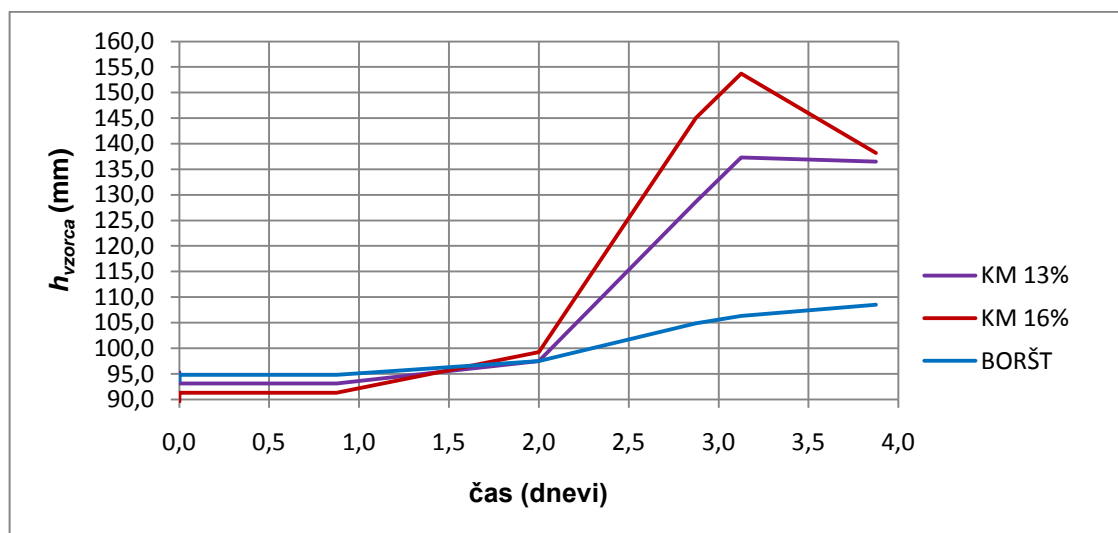
Vzorec	Začetna vlažnost $w$ (%)	Vlažnost po namakanju $w$ (%)	Vlažnost na koncu preiskave $w$ (%)	$\Delta w$ zaradi namakanja (%)	$\Delta w$ zaradi namak. in zmrz. (%)
BORŠT	25,7	26,4	27,7	0,7	2,0
KM 13%	15,0	20,9	22,7	5,9	7,7
KM 16%	17,6	21,0	23,6	3,4	6,0
KM 21%	21,7	20,4	22,1	-1,3	0,4
M 15%	15,7	18,5	19,7	2,8	4,0
M 19%	17,6	18,8	19,6	1,2	2,0
S3 3%	4,1	12,7	12,3	8,6	8,2
S3 9%	10,9	10,9	12,4	0,0	1,5
S 10%	10,5	14,0	15,3	3,5	4,8
S 18%	13,0	13,5	12,7	0,5	-0,3

Preglednica 5.3:  $\Delta \rho_d$  ( $t/m^3$ ) pri cikličnem zmrzovanju in tajanju

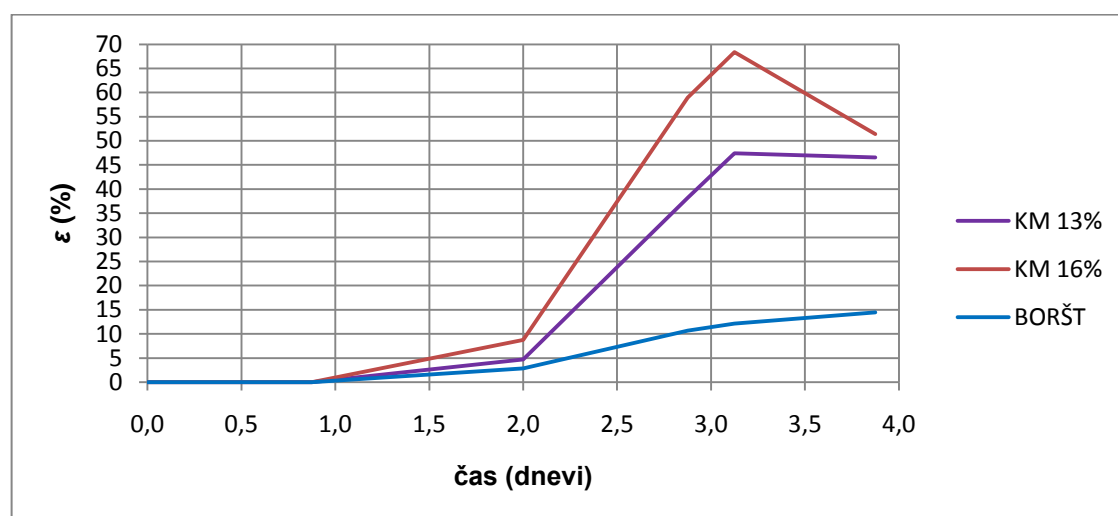
Vzorec	Začetna suha gostota $\rho_d$ ( $t/m^3$ )	Suha gostota po namakanju $\rho_d$ ( $t/m^3$ )	Suha gostota na koncu preiskave $\rho_d$ ( $t/m^3$ )	$\Delta \rho_d$ zaradi namakanja ( $t/m^3$ )	$\Delta \rho_d$ zaradi namak. in zmrz. ( $t/m^3$ )
BORŠT	1,58	1,57	1,53	-0,01	-0,05
KM 13%	1,66	1,66	1,69	0,0	0,03
KM 16%	1,67	1,66	1,68	-0,01	0,01
KM 21%	1,72	1,75	1,69	0,03	-0,03
M 15%	1,65	1,65	1,66	0,0	0,01
M 19%	1,65	1,65	1,66	0,0	0,01
S3 3%	1,88	1,87	1,95	-0,01	0,07
S3 9%	1,94	1,94	2,00	0,0	0,06
S 10%	1,76	1,73	1,76	-0,03	0,0
S 18%	1,79	1,78	1,79	-0,01	0,0

## 5.2 Rezultati zmrzovanja in tavanja zemljin z odprtim sistemom

### 5.2.1 Kamena moka in glina Boršt



Slika 5.25:  $\Delta h_{vzorca}$  (mm) KM in gline med zmrzovanjem z odprtim sistemom



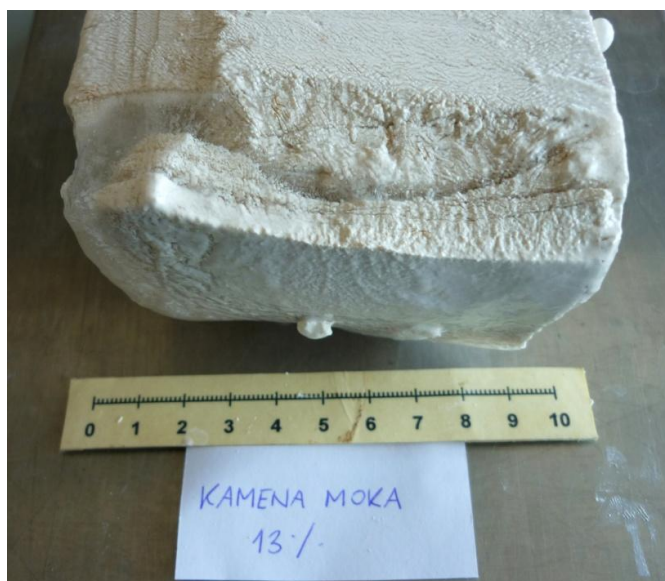
Slika 5.26:  $\Delta \varepsilon$  (%) KM in gline med zmrzovanjem z odprtim sistemom

#### 5.2.1.1 Kamena moka

Kamena moka ima dobro prepustnost. Ledene leče so nastajale v spodnjem delu vzorca, kjer so tudi vidne na sliki 5.27 in 5.28.

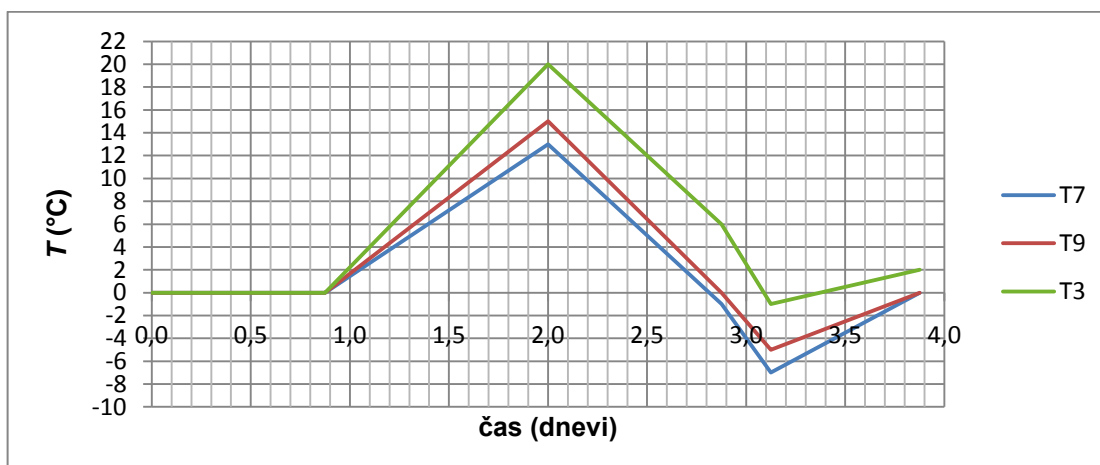


Slika 5.27: Vidne so ledene leče v spodnjem delu vzorca KM 13%



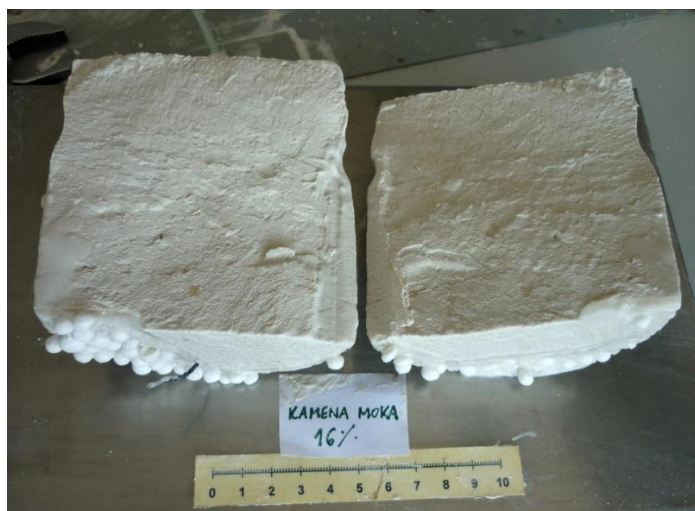
Slika 5.28: Približane ledene leče v spodnjem delu vzorca KM 13%





Slika 5.29:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu KM 16% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Zgornji del vzorca je bil zamrznjen v debelini 10,3 cm. Spodnji del je bil utekočinjen v debelini 3,5 cm.



Slika 5.30: KM 16% zgoraj in notranja tekstura po končanih raziskavah

### 5.2.1.2 Glina Boršt

Glina je manj prepustna v primerjavi z ostalimi zemljinami. Ledene leče so nastajale v zgornjem delu vzorca, kar je razvidno na sliki 5.32 in 5.33. Na sliki 5.31 je viden nastanek bočne deformacije v zgornjem delu vzorca, po čem lahko sklepam, da so med zmrzovanjem na tem mestu nastajale večje bočne napetosti.

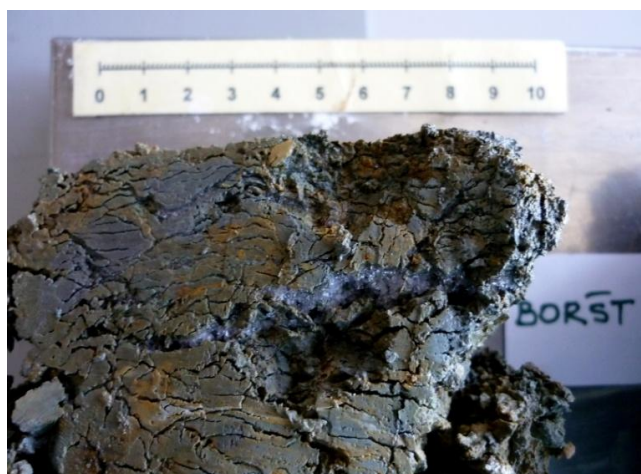




Slika 5.31: Vidna je deformacija na glini Boršt v zgornjem delu

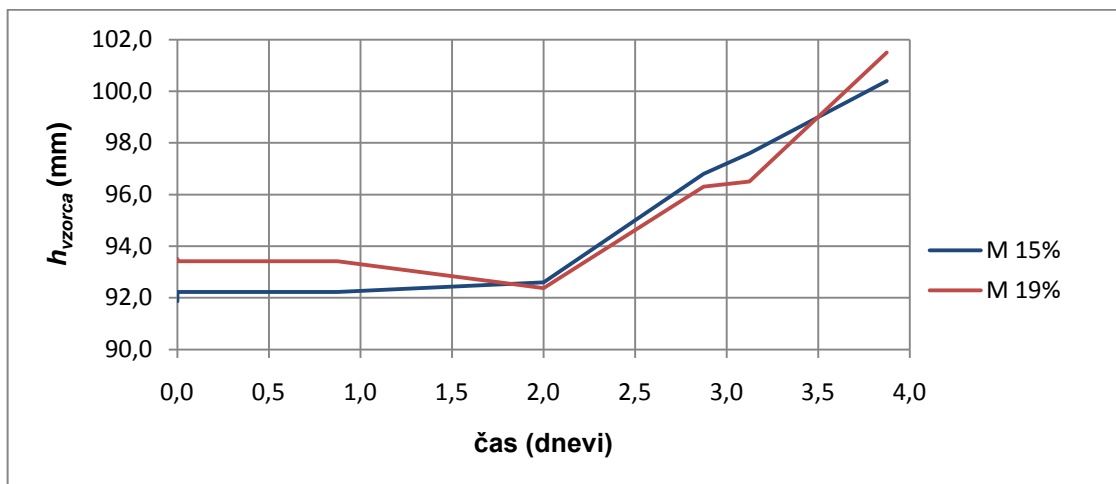


Slika 5.32: Vidne so razpoke in nastanek ledenih leč zgoraj na glini Boršt

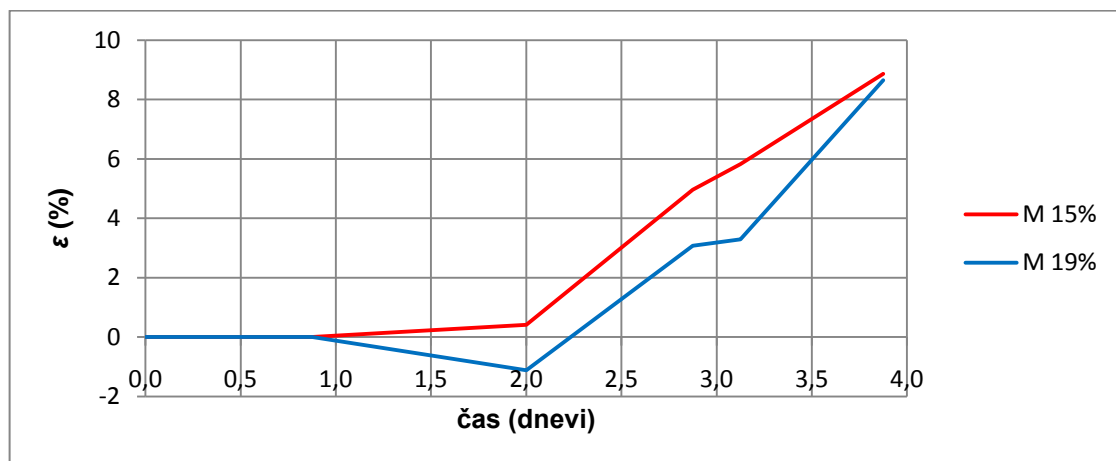


Slika 5.33: Razpoke in tvorba ledene leče v zgornjem delu na glini Boršt

## 5.2.2 Pesek Mokrice



Slika 5.34:  $\Delta h_{vzorca}$  (mm) pesek Mokrice med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 5.35:  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorcev pesek Mokrice med zmrzovanjem z odprtim sistemom

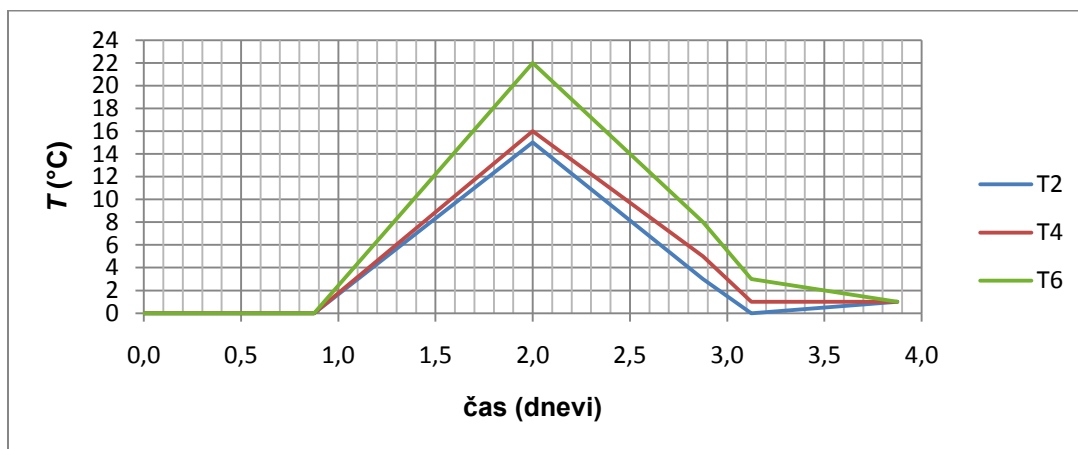
### 5.2.2.1 Mokrice 15%

Vzorec peska je bil zamrznjen v zgornjem delu. Niso nastajale večje ledene leče, ampak le zelo tenke plasti ledu v zgornjem delu vzorca (slika 5.36).



Slika 5.36: Vzorec M 15% po koncu raziskave brez večjih posebnosti

#### 5.2.2.2 Mokrice 19%

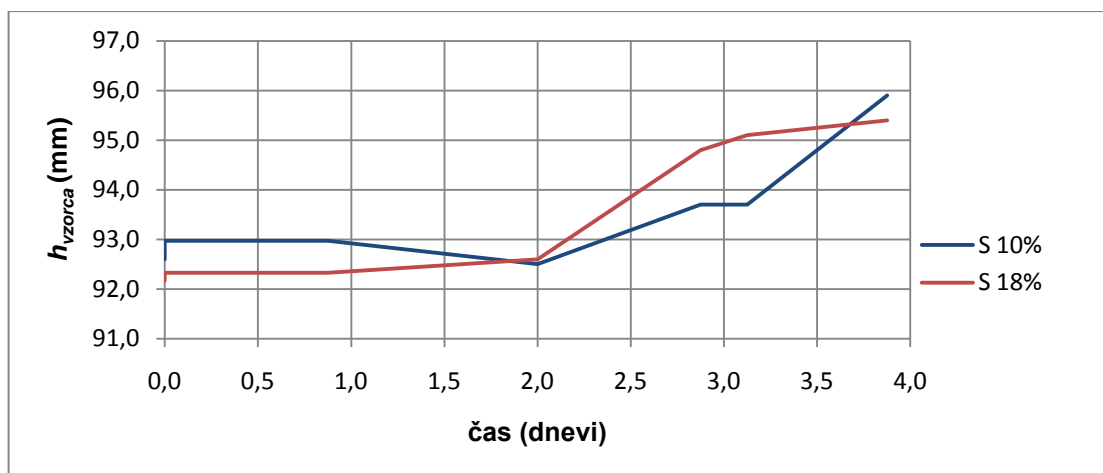
Slika 5.37:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu M 19% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Spodnje temperaturno tipalo je bilo na meji zmrzovanja, zgornja dva pa sta bila zamrznjena. To pomeni, da je vzorec bil zamrznjen skoraj v celoti, večinoma pa v zgornjem delu. Ledene leče niso bile vidne.



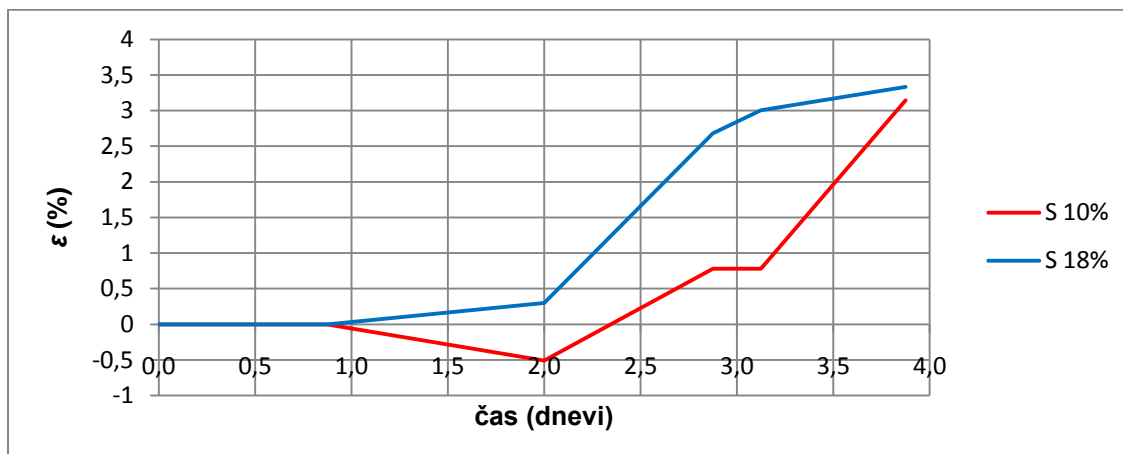
Slika 5.38: Vzorec M 19% po koncu raziskave

### 5.2.3 Pesek Stahovica



Slika 5.39:  $\Delta h_{vzorca}$  (mm) pesek Stahovica med zmrzovanjem z odprtim sistemom





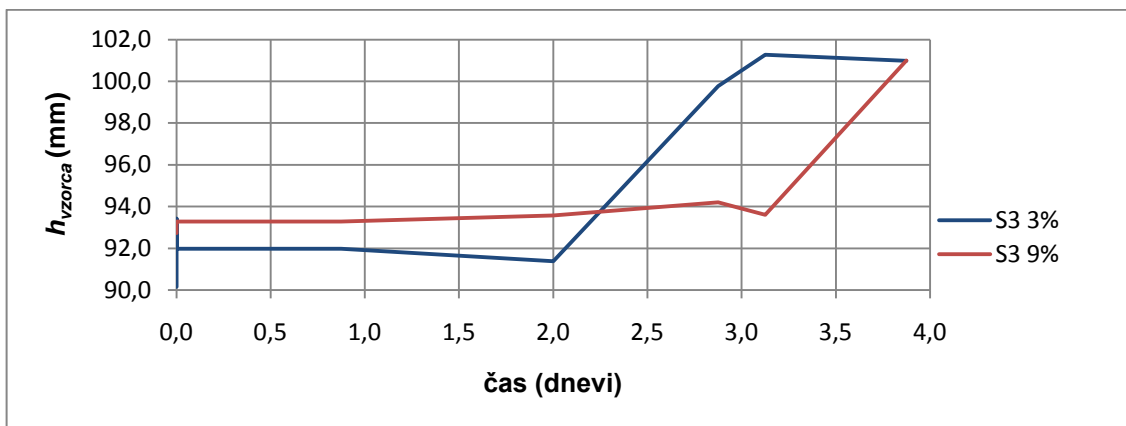
Slika 5.40:  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorcev pesek Stahovica med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Zgornji del je bil zamrznjen v višini 7,5 cm. Nezamrznjen del vzorca je bil spodaj v debelini 2,5 cm. Pesek S 18% je dobro prepusten, ni bilo opaziti nastanka ledenih leč.

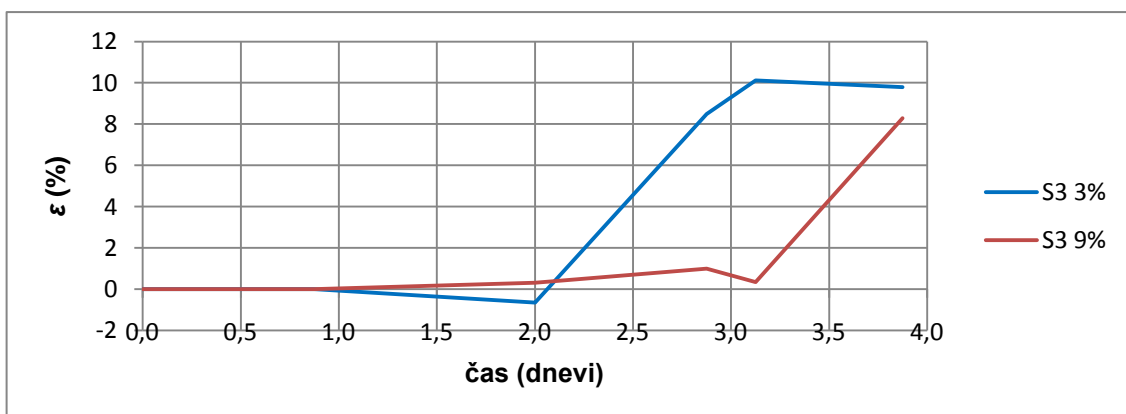


Slika 5.41: Vzorec S18% brez posebnosti po koncu raziskave

### 5.2.4 Pesek Stahovica 3

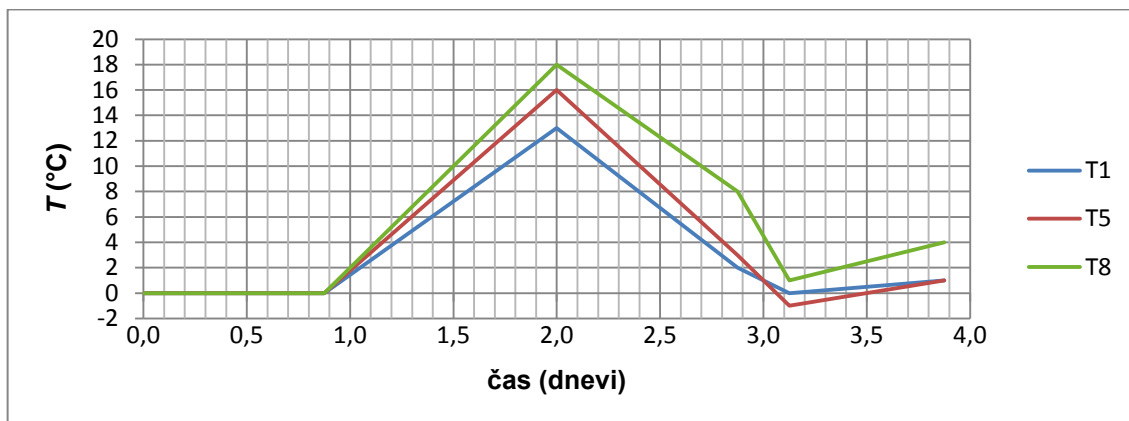


Slika 5.42:  $\Delta h_{\text{vzorca}}$  (mm) Stahovica 3 med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 5.43:  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorcev Stahovica 3 med zmrzovanjem z odprtim sistemom

#### 5.2.4.1 Stahovica 3 3%

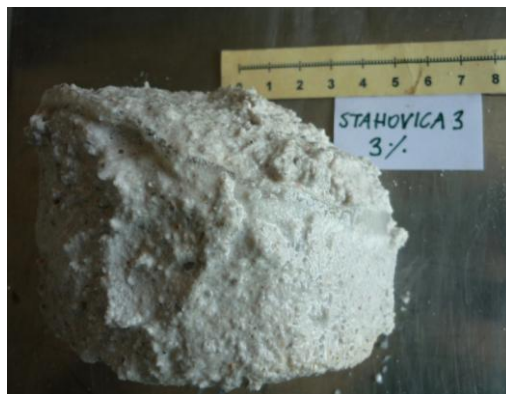


Slika 5.44:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu S3 3% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Zgornje in sredinsko temperaturno tipalo je zamrznilo, za razliko od spodnjega. Viden je nastanek in potek ledene leče na sliki 5.45 in 5.46.

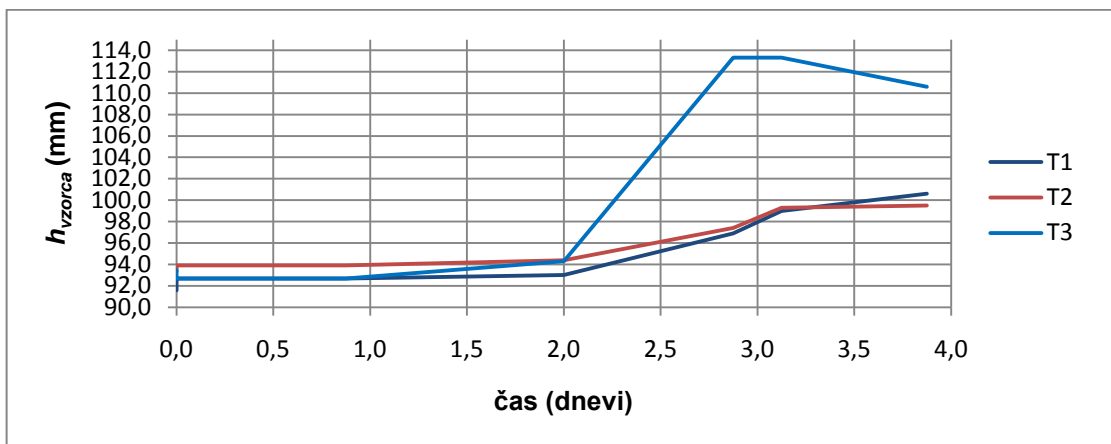


Slika 5.45: Vidna je ledena leča v srednjem zunanem delu vzorca S3 3%

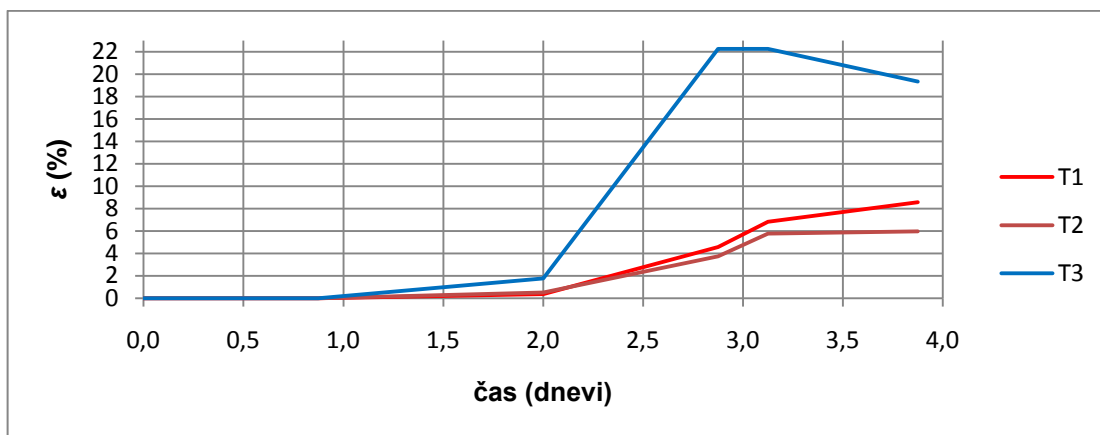


Slika 5.46: Viden potek ledene leče na vzorcu Stahovica 3 3%

### 5.2.5 Nevezane nosilne plasti



Slika 5.47:  $\Delta h_{\text{vzorca}}$  (mm) tamponov med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 5.48:  $\Delta \varepsilon$  (%) vzorcev tamponov med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 5.49: Viden je del votlih prostorov v vzorcu T2 na koncu raziskave



Vzorec T2 je bil odtajen v spodnjem delu v višini 2,0 cm. Vidne so bile zračne pore.  
Tako po koncu raziskave je bil vzorec zamrznjen v zgornjem delu v višini 7,0 cm. Spodnji del je bil nezamrznjen v višini 3,0 cm.



Slika 5.50: Vzorec T3, pogled od zgoraj na koncu raziskave



Slika 5.51: Vzorec T3 na koncu raziskave zmrzovanja

Preglednica 5.4: Volumske deformacije pri preizkusu z odprtim sistemom

čas (dnevi)	Glina		Kamena moka		Pesek Mokrice		Pesek Stahovica 3	
	BORŠT		KM 13%		M 15%		S3 3%	
	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)
Začetno stanje		93,7		89,6		91,9		90,2
Po saturaciji		94,8		91,3		92,2		93,4
0,0 (tajanje)	0,0	94,8	0,0	91,3	0,0	92,2	0,0	93,4
0,9 (zmrz.)	0,0	94,8	0,0	91,3	0,0	92,2	0,0	93,4
2,0 (tajanje)	2,8	97,5	4,7	99,3	0,4	92,6	-1,1	92,4
2,9 (zmrz.)	10,7	104,9	38,2	145,1	5,0	96,8	3,1	96,3
3,1 (zmrz.)	12,1	106,3	47,4	137,3	5,8	97,6	3,3	96,5
3,9 (zmrz.)	14,5	108,5	46,6	136,5	8,9	100,4	8,6	101,5

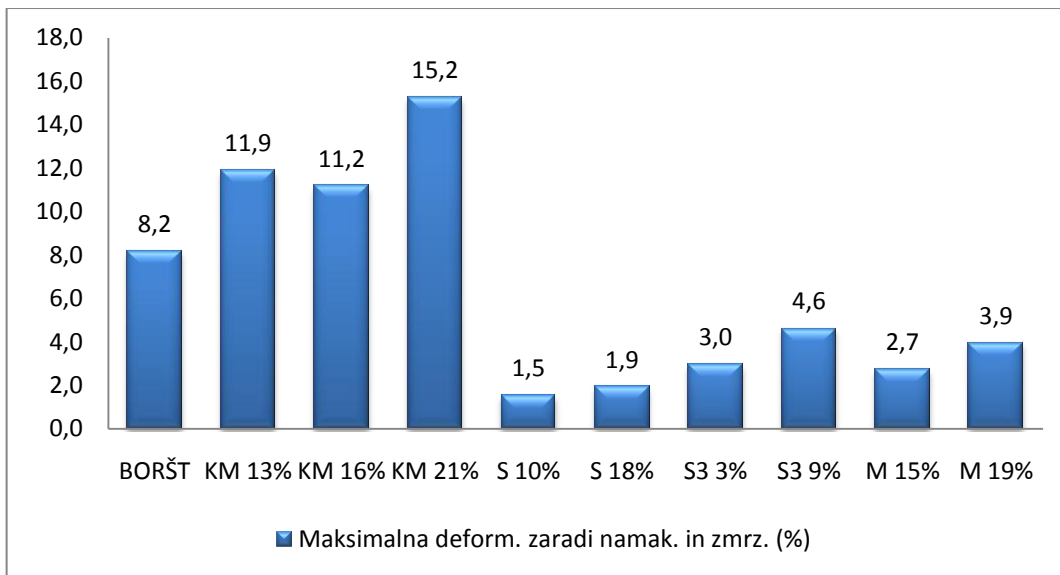
čas (dnevi)	Pesek Stahovica		Nevezana nosilna plast							
	S 10%		S 18%		T1		T2		T3	
	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)	$\epsilon_{zmiz}$ (%)	$H_{vzorca}$ (mm)
Začetno stanje		92,6		92,2		91,6		93,4		93,5
Po saturaciji		93,0		92,3		92,7		93,9		92,7
0,0 (tajanje)	0,0	93,0	0,0	92,3	0,0	92,7	0,0	93,9	0,0	92,7
0,9 (zmrz.)	0,0	93,0	0,0	92,3	0,0	92,7	0,0	93,9	0,0	92,7
2,0 (tajanje)	-0,5	92,5	0,3	92,6	0,4	93,0	0,5	94,4	1,8	94,3
2,9 (zmrz.)	0,8	93,7	2,7	94,8	4,6	96,9	3,7	97,4	22,3	113,3
3,1 (zmrz.)	0,8	93,7	3,0	95,1	6,8	99,0	5,8	99,3	22,3	113,3
3,9 (zmrz.)	3,1	95,9	3,3	95,4	8,6	100,6	6,0	99,5	19,3	110,6

Preglednica 5.5:  $\Delta w$  (%) pri zmrzovanju in tajanju z odprtim sistemom

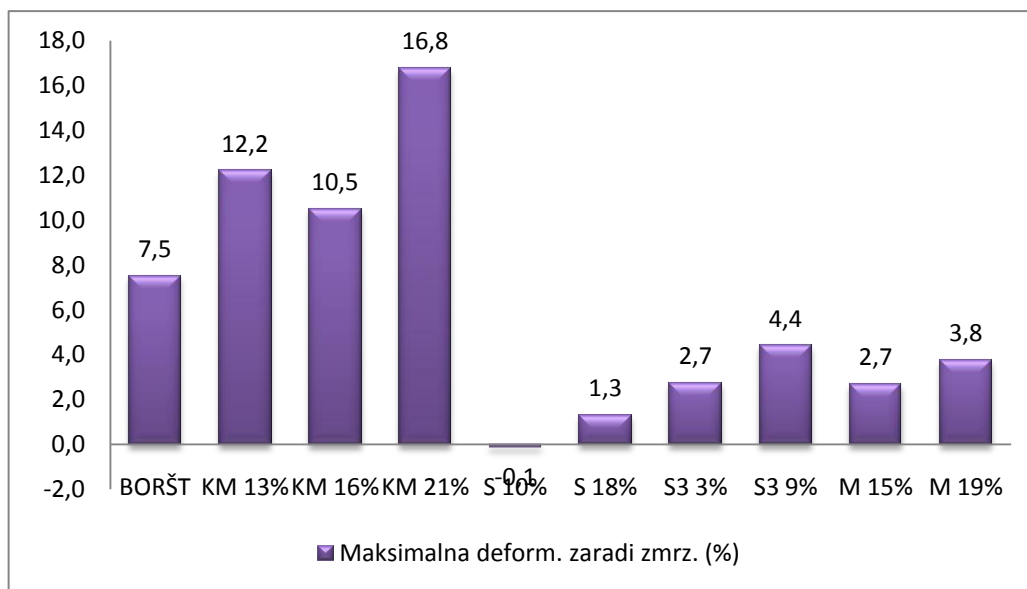
Vzorec	Začetna vlažnost $w$ (%)	Vlažnost na koncu preiskave $w$ (%)	$\Delta w$ zaradi namak. in zmrz. (%)
BORŠT	25,0	30,0	5,0
KM 13%	13,0	51,8	38,8
KM 16%	16,0	45,5	29,5
M 15%	15,0	25,2	10,2
M 19%	19,0	25,0	6,0
S3 3%	3,0	16,0	13,0
S3 9%	9,0	12,2	3,2
S 10%	10,0	13,2	3,2
S 18%	18,0	14,6	-3,4
T1	3,0	7,0	4,0
T2	5,0	5,7	0,7
T3	3,0	8,6	5,6

## 6 ANALIZA ZMRZOVANJA IN TAJANJA ZEMLJIN

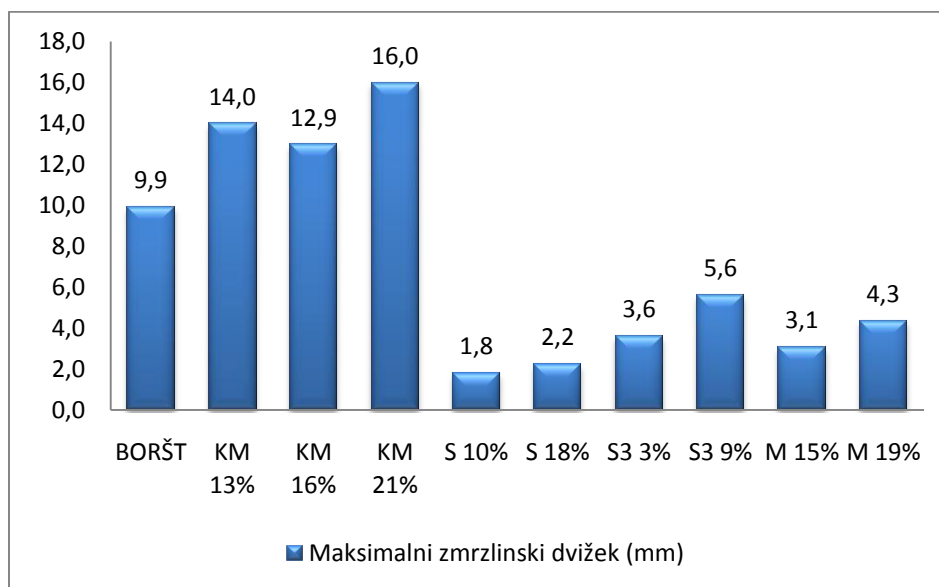
### 6.1 Analiza cikličnega zmrzovanja in tajanja



Slika 6.1:  $\epsilon_{max}$  (%) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjem



Slika 6.2:  $\epsilon_{zmrz.max}$  (%) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjem

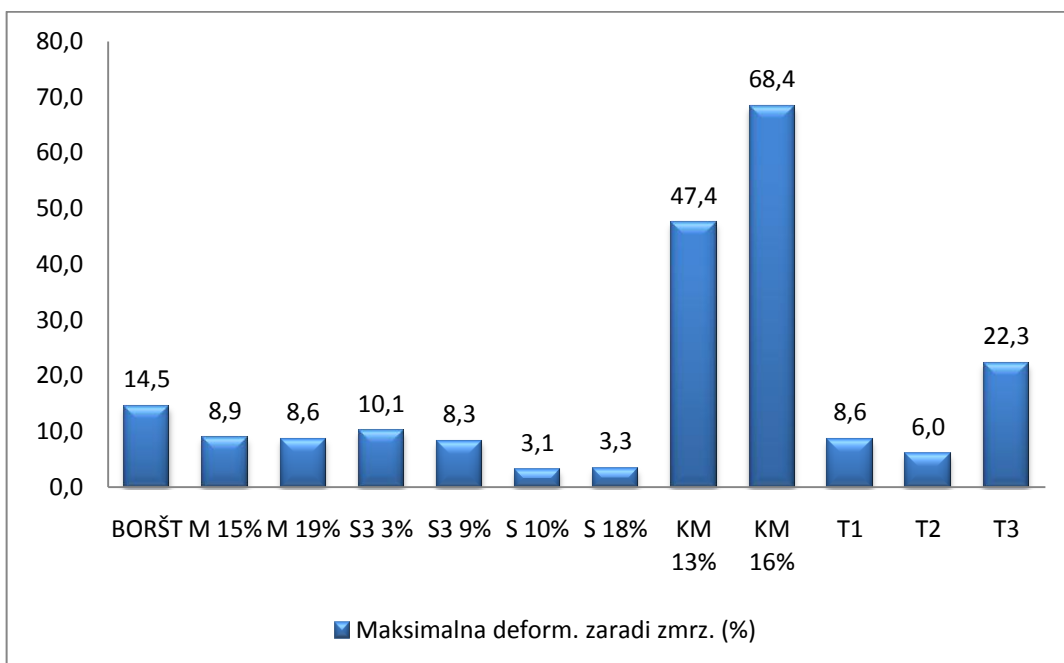
Slika 6.3:  $\Delta h_{max}$  (mm) zemljin med cikličnim zmrzovanjem in tajanjemPreglednica 6.1: Razlika med začetnim  $H_{vzorca}$  (mm) in končnim  $H_{vzorca}$  (mm)

S 10%	S 18%	M 15%	M 19%	KM 13%	KM 16%	KM 21%	BORŠT	S3 3%	S3 9%
-0,1	0,0	-0,7	-0,3	-2,2	-1,1	2,4	3,8	-4,8	-3,6

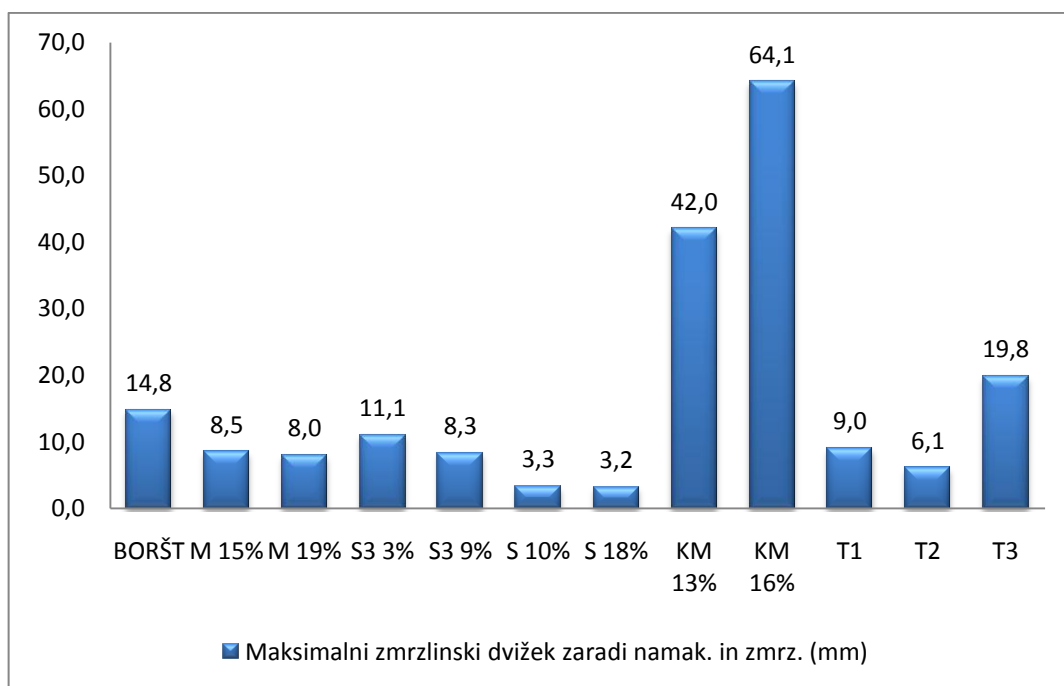
Po maksimalni suhi gostoti in optimalni vlagi so bili za preiskavo zgoščeni materiali Mokrice 15%, Kamena moka 16%, ter Stahovica 3 9%. Rezultati kažejo, da se obnašanje zemljin pri zmrzovanju in tajanju izboljšuje s stopnjo zgoščenosti. Če je zemljina zgoščena pri optimalni vlagi se pojavijo manjši zmrzlinški dvižki, kot pa če je optimalna vlažnost prekoračena.

## 6.2 Analiza odprtega sistema zmrzovanja

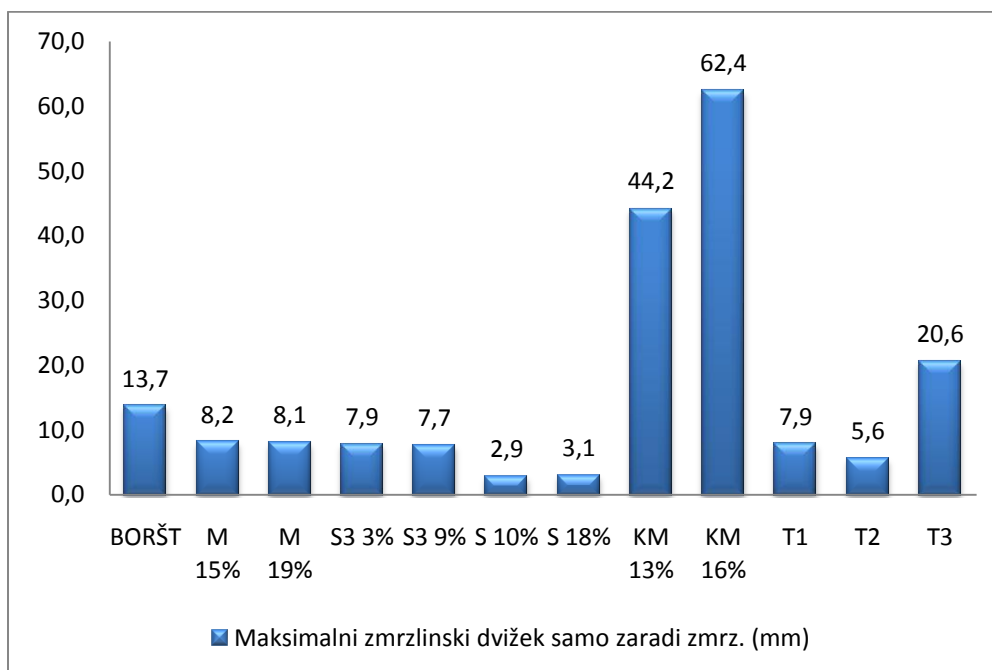
Na sliki 6.4 je razvidno, da sta največjo deformacijo dosegla oba vzorca kamene moke, maksimalen dvižek je dosežen pri vzorcu Kamena moka 16%. Najmanjša zmrzlinška dvižka sta bila pri obeh vzorcih Stahovice, minimalen je pri Stahovica 10% in znaša 3,1%. Vsi vzorci so po koncu preiskave zmrzovanja bili zamrznjeni v zgornjem delu, razen vzorca KM 13%, kjer so se ledene leče tvorile v spodnjem delu.



Slika 6.4:  $\epsilon_{zmrz. max}$  (%) zemljin med zmrzovanjem z odprtim sistemom



Slika 6.5:  $\Delta h_{max}$  (mm) med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Slika 6.6:  $\Delta h_{zmrz. max}$  (mm) med zmrzovanjem z odprtim sistemom

### 6.3 Primerjava volumskih deformacij z različnimi vplivi

#### 6.3.1 Primerjava in vpliv deleža finih zrn na volumske deformacije

Preglednica 6.2: Vpliv deleža finih zrn na velikost deformacije

Material	Oznaka materiala	Delež finih zrn (mas. %)	Maksimalna deformacija (%)
Kamena moka	KM	100,0 %	10,5 – 68,4
Glina Boršt	BORŠT	88,0 %	7,5 – 14,5
Pesek Stahovica 3	S3	18,0 %	2,7 – 10,1
Pesek Mokrice	M	7,5 %	2,7 – 8,9
Pesek Stahovica	S	4,0 %	1,3 – 3,3

Preglednica 6.3: Vpliv deleža finih zrn v nevezanih plasteh na deformacije

Material	Oznaka materiala	Delež finih zrn (mas. %)	Maksimalna deformacija (%)
NNP 3	T3	18,0 %	22,3
NNP 1	T1	7,0 %	8,6
NNP 2	T2	3,0 %	6,0

Iz preglednice 6.3 je razvidno, da nevezane nosilne plasti obogatene s finimi zrnji katerih delež presega 7,0 mas. %, dosegajo visoke deformacije.

V cestogradnji, bi morali biti na materiale s podobnimi lastnostmi posebej pozorni.

### 6.3.2 Vpliv vrednosti metilen modro na volumske deformacije

Preglednica 6.4: Vpliv vrednosti *MB* na velikost deformacije pri zmrzovanju

Material	Oznaka materiala	Metilen modro vrednost (g/kg)	Maksimalna deformacija (%)
Kamena moka	KM	2,00	10,5 – 68,4
Glina Boršt	BORŠT	43,67	7,5 – 14,5
Pesek Stahovica 3	S3	0,25	2,7 – 10,1
Pesek Mokrice	M	2,00	2,7 – 8,9
Pesek Stahovica	S	0,25	1,3 – 3,3

### 6.3.3 Gibanje temperature v vzorcih pri odprtem sistemu zmrzovanja

Na treh vzorcih, kjer sem meril spremembe temperature v notranjosti, je v preglednicah 6.5, 6.6 in 6.7 prikazano gibanje temperature v treh slojih. Iz preglednic je razvidno, da je na zgornjih temperaturnih tipalih izmerjena vedno najnižja temperatura. Vzorci so se zmrzovali z zgornje strani navzdol, zato si vrednosti temperature posledično sledijo od nižjih proti višjim. Spodaj na dnu vzorcev je neprekinjeno krožila nezamrznjena voda, zato so spodaj temperature najvišje in nad ničlo. Vzorec Stahovica 3 3% in Kamena moka 16% imata nekoliko nižje izmerjene temperature od vzorca Mokrice 19%. Predpostavim, da je razlika zaradi postavitve vzorcev. Stahovica 3 3% in Kamena moka 16% sta med zmrzovanjem bila postavljena na



zunani strani, kjer je zmrzovalo bolj intenzivno kot v notranjosti škatle, kjer je bil sredinsko postavljen vzorec Mokrice 19%. Za saturirane, drobnozrnate zemljine obstaja linearna zveza med stopnjo zmrzlinkega dviška in temperaturnim gradientom (Konrad and Morgenstern, 1980).

Preglednica 6.5:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu M 19% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Vzorec	Temperaturno tipalo	Izmerjena temperatura v zaporednih časovnih intervalih (°C)			
		48 h	70 h	75 h	94 h
Mokrice 19%	Zgornji (T2)	15	3	0	1
	Srednji (T4)	16	5	1	1
	Spodnji (T6)	22	8	3	1

Preglednica 6.6:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu S3 3% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Vzorec	Temperaturno tipalo	Izmerjena temperatura v zaporednih časovnih intervalih (°C)			
		48 h	70 h	75 h	94 h
Stahovica 3 3%	Zgornji (T1)	13	2	0	1
	Srednji (T5)	16	3	-1	1
	Spodnji (T8)	18	8	1	4

Preglednica 6.7:  $\Delta T$  (°C) v vzorcu KM 16% med zmrzovanjem z odprtim sistemom

Vzorec	Temperaturno tipalo	Izmerjena temperatura v zaporednih časovnih intervalih (°C)			
		48 h	70 h	75 h	94 h
Kamena moka 16%	Zgornji (T7)	13	-1	-7	0
	Srednji (T9)	15	0	-5	0
	Spodnji (T3)	20	6	-1	2

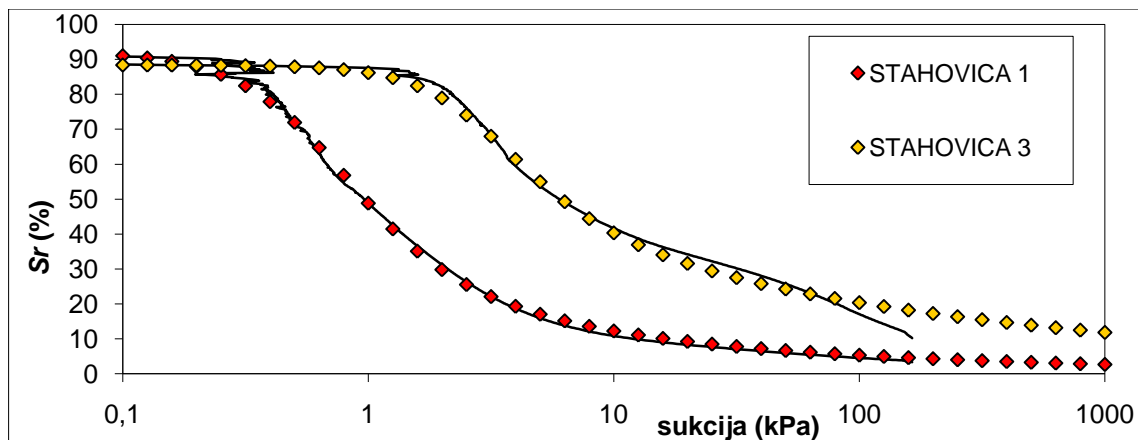
### 6.3.4 Primerjava in vpliv $w$ (%) in $S_r$ (%) na volumske deformacije

Preglednica 6.8: Vpliv  $w$  (%) in  $S_r$  (%) na velikost deformacije pri zmrzovanju

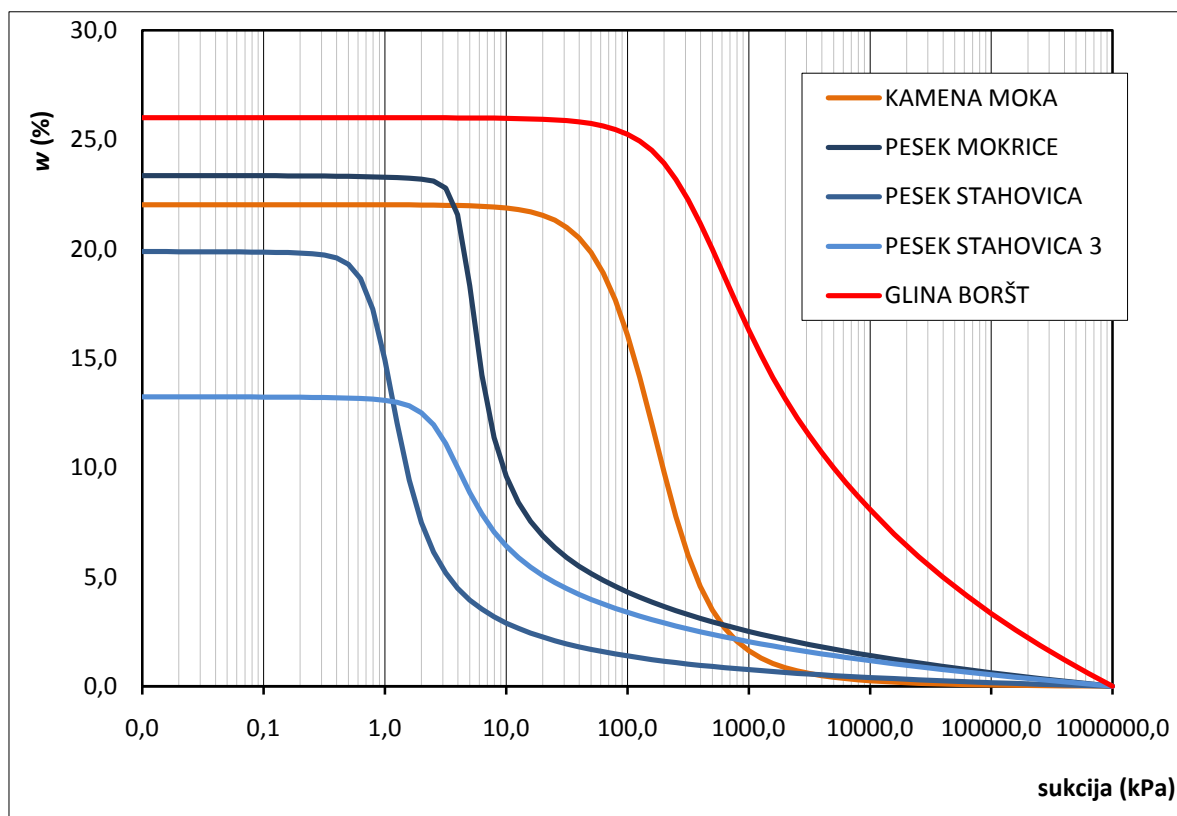
Material	Oznaka	$w$ na koncu preizkusa (%)	$S_r$ na koncu preizkusa zmrzovanja (%)	Maks. deformacija (%)
Kamena moka	KM	23,6	100,0 %	10,5 – 68,4
Glina Boršt	BORŠT	27,7	96,0 %	7,5 – 14,5
Pesek Stahovica 3	S3	12,4	94,0 %	2,7 – 10,1
Pesek Mokrice	M	19,7	84,0 %	2,7 – 8,9
Pesek Stahovica	S	15,3	76,0 %	1,3 – 3,3

### 6.3.5 Primerjava sukcije zemljin z rezultati raziskave

Retenzijske krivulje vseh materialov v eksperimentu so prikazane na grafih v prilogah. Prikazujejo razmerje med vlažnostjo in sukcijo zemljine. Posamezni materiali so na grafih primerjani s kameno moko kot najbolj zmrzljivo občutljivim materialom v eksperimentu z oznako WP – 4, in povprečno vrednostjo sukcije med spodnjim in zgornjim merilcem z oznako HYPROP – avg.



Slika 6.7: Desaturacija materiala Stahovica in Stahovica 3 z naraščanjem sukcije



Slika 6.8: Skupna primerjava retenzijskih krivulj zemljin v raziskavi

Iz slike 6.8 je razvidno, da bolj kot je zemljina fino granulirana, večje so sile med delci zemljine in vodo. Rezultat je, da ima glina v enakih pogojih precej višje vrednosti sukcije v primerjavi z različnimi peski, ali kameno moko.

Na retenzijski krivulji točka rezidualne vlage označuje stanje po desaturaciji, pri katerem je vsa voda v zemljini vezana na površino zrna z adsorpcijsko sposobnostjo zrna.

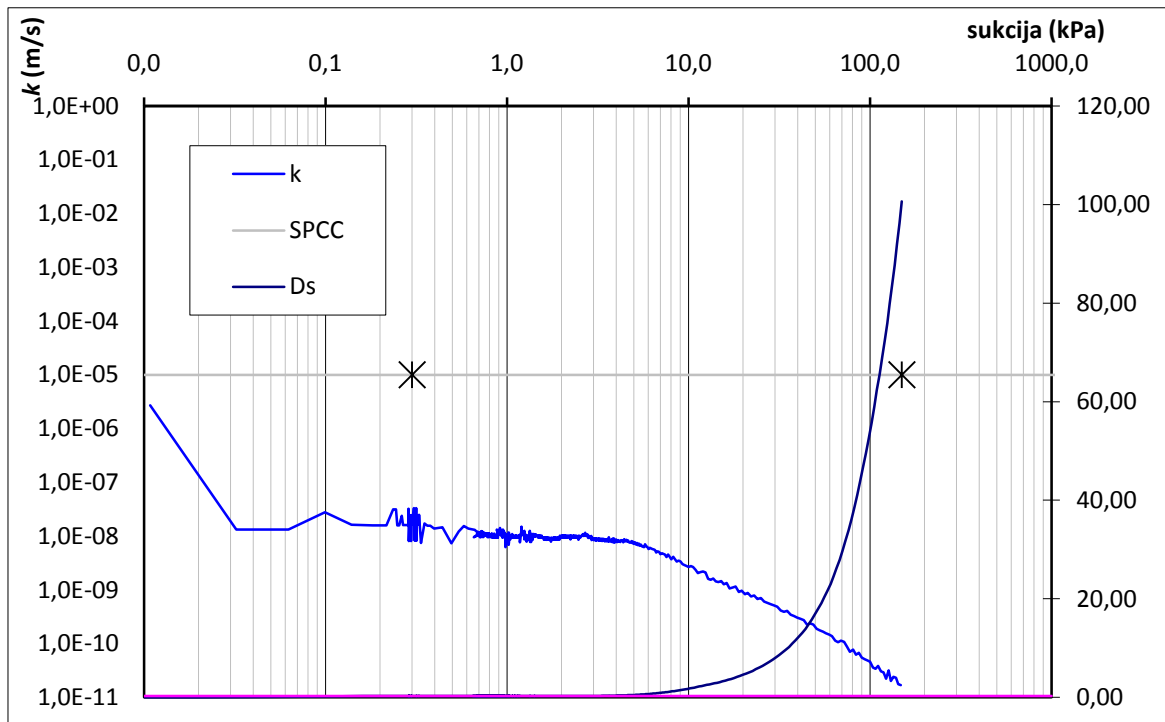
To pomeni, da čim večja je vlažnost materiala v točki rezidualne vlage, tem večja je vsebnost aktivnih površin v določeni zemljini, kar zmanjšuje zmrzlinško odpornost zemljine. V preglednici 6.9 je primerjava z oceno aktivnih površin zemljin iz točke rezidualne vlage z vrednostmi metilen modro. Kot rezultat se oba pokazatelja vsebnosti aktivnih površin ali njihove stopnje aktivnosti po velikostnem redu ujemata.

Preglednica 6.9: Primerjava vrednosti iz točke rezidualne vlage z vrednostmi *MB*

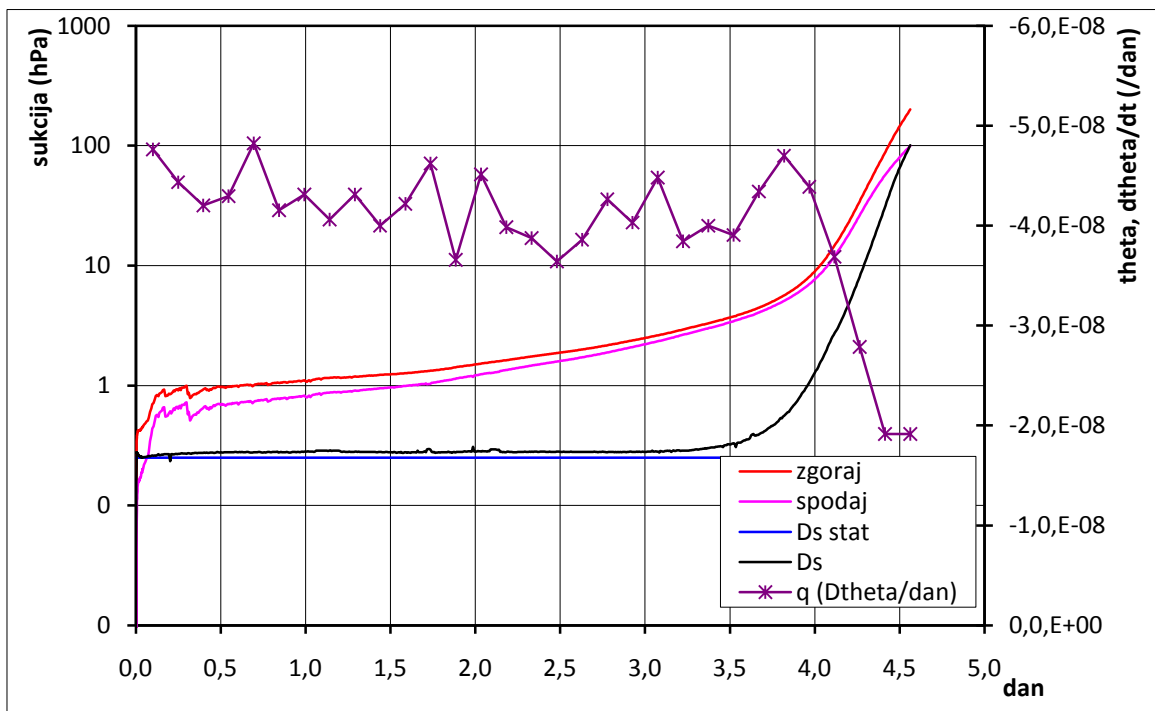
<b>Vzorec</b>	<b>Sukcija v točki rezidualne vlage (kPa)</b>	<b>Vlažnost v točki rezidualne vlage (%)</b>	<b><i>MB</i> vrednost (g/kg)</b>
GLINA BORŠT	2000,0	13,2	43,67
KAMENA MOKA	600,0	10,1	2,00
PESEK MOKRICE	20,0	6,9	2,00
PESEK STAHOVICA 3	20,0	5,1	0,25
PESEK STAHOVICA	10,0	2,9	0,25

Na začetni točki cone kapilarnega zasičenja ima največjo vlažnost glina Boršt, nato ji sledi pesek Mokrice, kamena moka, pesek Stahovica in pesek Stahovica 3. V coni desaturacije imajo največjo vlažnost glina in kamena moka, nato sledijo pesek Mokrice in peski Stahovice. V coni rezidualne vlage kameni moki naglo upade vlažnost in stopnja saturacije, najverjetneje zaradi dreniranja vzorca.

Vzorec je na začetku popolnoma saturiran, do točke vstopa zraka v vzorec. Od te točke dalje poteka desaturacija vzorca. Kadar se vzorcu zmanjšuje stopnja saturacije se mu zmanjšuje tudi prepustnost. Kot primer je na sliki 6.9 prikazano upadanje koeficienta vodoprepustnosti z desaturacijo in istočasnim naraščanjem sukcije na pesku Stahovica.



Slika 6.9: Upadanje koeficienta vodoprepustnosti na pesku Stahovica



Slika 6.10: Prikaz naraščanja sukcije po dnevih na materialu Stahovica

#### **6.4 Ocena materialov na podlagi raziskave**

Največje volumske deformacije so nastale pri kameni moki, zato sklepam, da je to zmrzlinško zelo občutljiv material. Tudi v primeru, če kameno moko uporabimo kot polnilo s finimi delci v zmesi zrn, je prekomerna količina lahko zelo zmrzlinško nevarna.

Suha gostota je bila po koncu preiskave malo povišana, razen pri materialu KM 21%, kateremu se je zmanjšala. KM 21% se je pokazal kot zagotovo prevlažen in zato neprimeren material za preiskavo, saj je v kratkem času prišlo do utekočinjenja materiala. Najbolje se je obnesel material KM 16%, katerega začetna vlažnost pri preiskavi je tudi optimalna vlažnost.

Po kameni moki so največje volumske deformacije nastale pri materialu glina Boršt, katera nastopa v preiskavi kot predstavnik glin. Gline imajo specifične lastnosti, ki vplivajo na volumske deformacije. Sodeč po obliki deformacije na sliki 5.14 se lahko oceni, da so med zmrzovanjem v vzorcu nastajale večje bočne napetosti. Po preiskavi z odprtim sistemom so bile vidne razpoke, kar bi lahko vplivalo na prepustnost. Značilna oblika deformacij nastane že med začetnimi cikli zmrzovanja in tajanja, ter nato poteka približno enakomerno. Zaradi značilne vodovpojnosti glin, so lahko zelo nevarne ob zmrzovanju in lahko dosegajo visoke volumske deformacije, ter po tajanju lahko še naprej zadržujejo prekomerno količino vode.

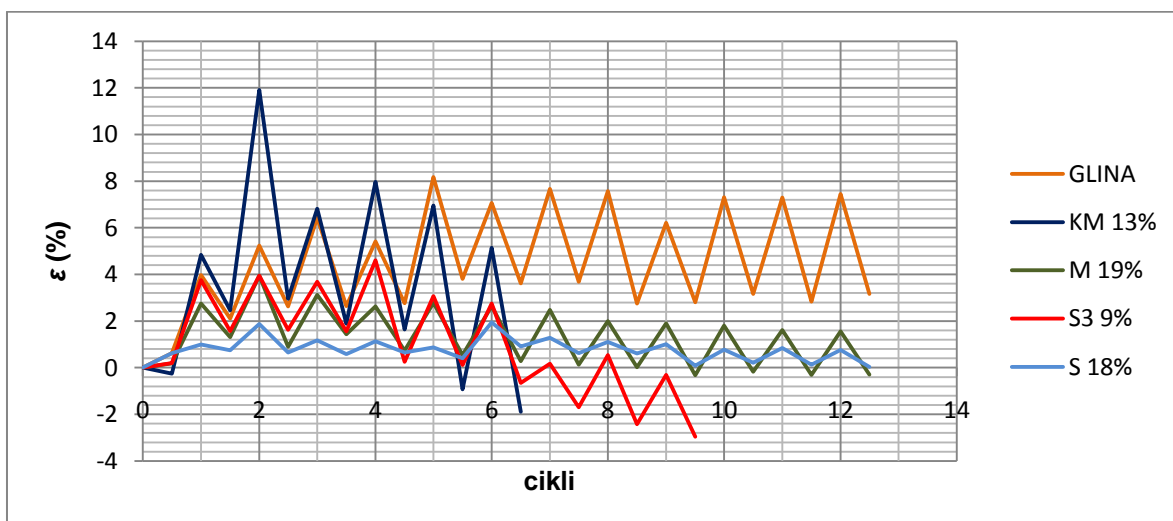
Pesek Stahovica 3 je material, kjer so nastajale večje volumske deformacije. Zagotovo ima večji vpliv prekomerni delež finih zrn v materialu. Pesku se je med preiskavo zelo povečevala vlažnost in stopnje saturacije. Vzorec se je med tajanjem zelo razlezel, in zmanjševala se je višina vzorca. Med zmrzovanjem in tajanjem, se mu je zelo povečala suha gostota.

Možno je, da zaradi izbranih začetnih vlažnosti pri vzorcu ni bilo možno doseči boljše zbitost po Proctorju. Večja zrna zemljine se nato pri tajanju pomikajo bolj skupaj, gostota materiala se zato zvišuje, višina pa se zmanjšuje.

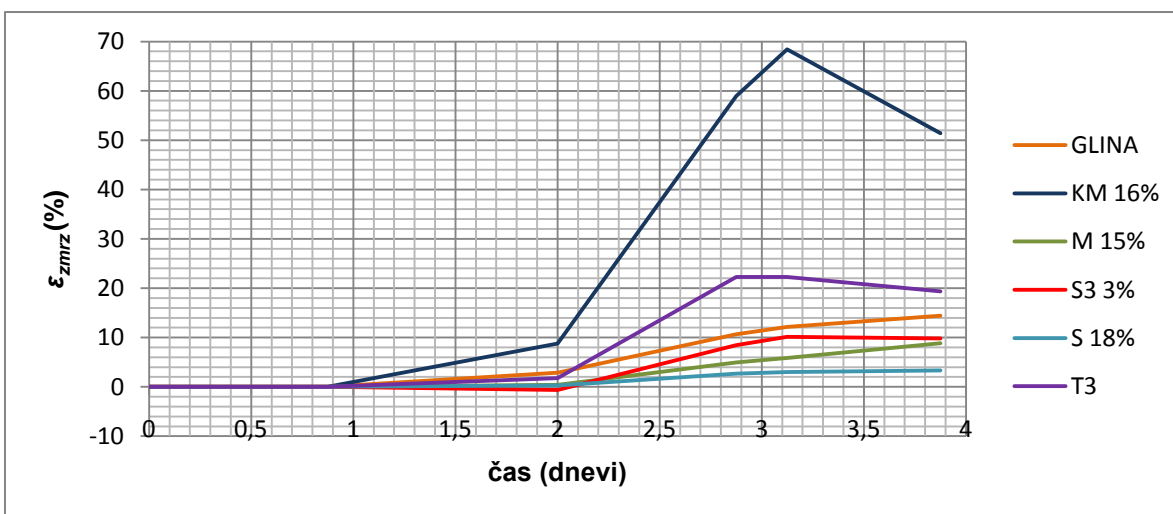
Pesek Mokrice se je pokazal kot dokaj stabilen material pri cikličnem zmrzovanju in tajanju. Deformacije, ki niso dosegale visoke vrednosti, so med preiskavo potekale enakomerno. Material je približno na meji med zmrzlinško odpornim in malo zmrzlinško občutljivim materialom.

Pesek Stahovica je material, kjer so v raziskavi pri zmrzovanju in tajanju nastajale najmanjše volumske deformacije, ki so bile v zelo majhnem območju glede na velikost. Material se je pri obeh preizkusih zmrzovanja pokazal kot stabilen med vplivom zmrzovanja in tavanja.

Trije vzorci nevezanih nosilnih plasti so bili preizkušani dodatno, zato nastopajo le v odprtem sistemu zmrzovanja. Izmed treh preizkušanih nevezanih nosilnih plasti so največje volumske deformacije nastajale pri vzorcu z oznako T3, kateri je imel 18,0 % delež finih zrn, najmanjše deformacije pa pri vzorcu z oznako T2, z najmanjšim 3,0 % deležem finih zrn.



Slika 6.11: Volumske deformacije materialov pri cikličnem zmrzovanju in tajanju



Slika 6.12: Volumske deformacije materialov pri odprtem sistemu zmrzovanja

## 7 ZAKLJUČKI

Merila za ocenjevanje zmrzljinske varnosti zemljin v cestogradnji pri zmrzljinski odpornosti temeljijo v glavnem na indeksnih kazalnikih kot so delež in kakovost finih zrn, meje plastičnosti, sposobnost vpijanja vode, vrednost metilen modro, itd. Raziskave na šestih različnih materialih so pokazale, da so volumske deformacije v veliki meri odvisne tudi od začetne in končne stopnje zasičenosti in vlažnosti materiala med raziskavo. Metilen modro test je v tem primeru lahko le kazalnik aktivnih zrn v zmesi, ki so lahko nevarni ob prisotnosti vode in pri zmrzovanju.

Faktorji v eksperimentu, z vplivom na volumske deformacije zemljin so:

- Zrnovostna sestava in delež finih zrn
- Začetna vlažnost materiala in stopnja saturacije
- Količina in razpoložljivost vode
- Metilen modro vrednost in sukcija zemljine kot pokazatelja adsorpcijske sposobnosti zrn v zemljini
- Način zmrzovanja (ciklično zmrzovanje, odprti sistem zmrzovanja)

Težišče ugotovitev in zaključkov je na opravljenih laboratorijskih raziskavah in analiziranih rezultatih, predstavljenih v diplomski nalogi. Z raziskavo smo pridobili primerljive rezultate volumskih deformacij med različnimi zemljinami, na osnovi katerih lahko ocenimo zmrzljinsko odpornost posamezne preizkušane zemljine ali kamenega agregata. Prikazani nestandardni preizkus zmrzljinske odpornosti se je pokazal za primernega in lahko bi se uporabil za ponovljive in primerljive rezultate.

Uporabljen je sistem enodimenzijskega cikličnega zmrzovanja in tajanja, ter kot dodatek za primerjavo odprti sistem zmrzovanja, kjer so se tvorile ledene leče. Nadgradnja naloge bi bila možna z opravljenimi terenskimi preizkusi, analizo mineraloške zgradbe finih zrn, zmrzovanjem in tajanjem z dodano obtežbo in merjenjem sprememb v nosilnosti materiala po koncu tajanja.



Ker zmrzlinški dvižki dosežejo svojo maksimalno vrednost relativno hitro, je pri določanju zmrzlinške odpornosti zemljin potrebno upoštevati tudi količino vode, ki jo vzorec lahko vpije med zmrzovanjem. Eksperiment je pokazal, da so precej večje deformacije nastale pri preiskavi zmrzovanja z odprtim sistemom. Odprti sistem zmrzovanja tako omogoča simulacijo neugodnih naravnih pogojev z neprekinjenim kroženjem nezamrznjene vode na dnu v zadostnih količinah.

Razvidno je, da se v materialih začetnih optimalnih vlažnosti določenih po Proctorju, v zmrzlinško manj odpornih materialih znatno poveča stopnja saturacije. Po nekaj ciklih zmrzovanja in tajanja lahko presega 85,0 % in na koncu dosega tudi do 100,0 % stopnje saturacije, kot na primer pri kamni moki. Povečana vlažnost zelo vpliva na izgubo nosilnosti materiala med tajanjem, ker lahko dodatna obtežba povzroči presežne porne tlake.

Preizkusi na zmrzal, so lahko praktični in učinkoviti pokazatelji zmrzlinške občutljivosti zemljin, zaradi povečevanja zahtev glede rabe naravnih surovin, ter kot dodatni kriterij kakovosti materialov pri zahtevam posameznega projekta.

Nestandardni laboratorijski preizkus volumskih deformacij zemljin in kamenih agregatov glede na vpliv zmrzovanja in tajanja se v praksi na primer lahko uporabi za oceno zmrzlinške varnosti v raznih primerih:

- Pri načrtovanju nevezanih nosilnih plasti v voziščnih konstrukcijah
- Za oceno kakovosti podlage pri načrtovanju cest
- Pri temeljenju objektov, kjer obstaja nevarnost zmrzovanja
- Za oceno zmrzlinške odpornosti mineralnih surovin in zemljin
- Pri izbiri nasipnega materiala pri podpornih konstrukcijah in nasipih
- Splošno za pokrajine z ekstremnimi temperaturnimi razlikami med letnimi časi

## VIRI

Annual book of ASTM standards. 2009. Section four construction. Volume 04.09. Soil and rock (II): D 5877 – latest: 1480 str.

Annual book of ASTM standards. 2002. Section four construction. Soil and rock: D 4943 – 02.

Bokalič, S. 2005. Možnost večkratne uporabe talnih vzorcev za določitev pF krivulj. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 28 str.

Brandl, H. 2001. Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures. Tokyo, A. A. Balkema: 289 str.

COST 337. 2000. Unbound Granular Materials for Road Pavements. Final Report of the Action: 386 str.

Das Braja M. 1998. Principles of Geotechnical Engineering, Fourth edition. Boston, PWS Publishing Company: 712 str.

Eigenbrod K.D. 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine – grained soils. Can. Geotech. J., 33: 529-537.

EN 13139 Gesteinskörnungen für Mörtel

[http://www.euroquarz.de/en13139\\_gesteinskoernungen.html](http://www.euroquarz.de/en13139_gesteinskoernungen.html) (21. 4.2010).

Geotechnical observations. What is soil suction?

<http://www.geo-observations.com/Information/Whatissoilsuction.html> (02. 7.2010).

Kakovost cest v Sloveniji

[http://www.motorevija.si/13.asp?L1\\_ID=38&L2\\_ID=142](http://www.motorevija.si/13.asp?L1_ID=38&L2_ID=142) (13. 7.2010).

Logar, J. 2003. Skripta pri predmetu Geotehnične gradnje v 3. letniku, Gradnja nasipov: str. 8-12.

Opravljene študijske vaje pri predmetu Mehanika tal s temeljenjem v šolskem letu 2006/2007.

Pavšič, J. 2000. Osnove geologije: za študente gradbeništva in rudarstva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: 227 str.

Tehnična specifikacija za javne ceste TSC 06.200: 2003. Nevezane nosilne in obrabne plasti. Ministrstvo za promet, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 18 str.

Tehnična specifikacija za javne ceste TSC 06.512: 2003. Projektiranje klimatski in hidrološki pogoji. Ministrstvo za promet, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 13 str.

Uršič, S. 2002. Matematične tabele in formule. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: 94 str.

Viklander P. 1998. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw. Can. Geotech. J., 35: 471-477.

Water potential in porous media

[http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod\\_3/chapt\\_4/main.htm](http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_4/main.htm) (13. 7.2010).

Woodward, D., Woodside, A., Jellie, J. 2002. Clay in Rocks. University of Ulster, Highway Engineering Research Group, Newtownabbey, Co Antrim BT37 0QB, UK: 11 str.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest, voziščne konstrukcije, 2. Izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.

## PRILOGA A: DOLOČANJE VPIJANJA VODE PO ENSLIN – NEFF METODI

### A1: Določanje vpijanja vode na materialu glina Boršt

DOLOČANJE VPIJANJA VODE								
DIN 18132: 1995-12								
LOKACIJA: BORŠT			D.N.: Diplomaska naloga					
ZEMLJINA: GLINA POD SITOM 0,063 mm								
priprava vzorca: GLINA POD 0,063 mm, predhodno presejana in posušena temperatura: 21,4 °C masa vzorca $m_d$ : 1,000 g								
	čas	ODČITEK (mL)		MASA VODE $m_w$ (g)		ABSORPCIJA $w_A$ (%)		
		vzorec 1	vzorec 2	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 2
sec	0	4,950	4,920	0,000	0,000	0	0	0
sec	15	4,900	4,840	0,050	0,080	5	8	8
sec	30	4,820	4,750	0,130	0,170	13	17	17
min	1	4,690	4,630	0,260	0,290	26	29	29
min	2	4,490	4,440	0,460	0,480	46	48	48
min	4	4,275	4,230	0,675	0,690	68	69	69
min	8	4,235	4,200	0,715	0,720	72	72	72
min	15	4,225	4,190	0,725	0,730	73	73	73
min	30		4,185		0,735			74
min	45		4,180		0,740			74
ure	1							
ure	2							
ure	4							
ure	6							
ure	24							

ABSORPCIJA $w_A$ :	73	%
--------------------	----	---

PREISKAVE: M. Mazurek	PREGLEDAL: dr. A. Petkovšek
ZAČ. PREISKAVE: 11.05.2010	
KON. PREISKAVE: 11.05.2010	

## A2: Določanje vpijanja vode na materialu kamena moka

DOLOČANJE VPIJANJA VODE								
DIN 18132: 1995-12								
LOKACIJA:			KAMNOLOM STAHOVICA			D.N.: Diplomaska naloga		
ZEMLJINA:			KAMENA MOKA					
priprava vzorca: sušenje in tehtanje pred preiskavo								
temperatura:			25,3 °C					
masa vzorca 1 $m_d$ :			1.001 g					
masa vzorca 2 $m_d$ :			1.000 g					
	čas	ODČITEK (mL)		MASA VODE $m_w$ (g)		ABSORPCIJA $w_A$ (%)		
		vzorec 1	vzorec 2	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 1	vzorec 2	
sec	0	4,980	4,930	0,000	0,000	0	0	
sec	15	4,880	4,830	0,100	0,100	10	10	
sec	30	4,750	4,700	0,230	0,230	23	23	
min	1	4,660	4,620	0,320	0,310	32	31	
min	2	4,650	4,610	0,330	0,320	33	32	
min	4	4,650	4,600	0,330	0,330	33	33	
min	8		4,600		0,330		33	
min	15							
min	30							
min	45							
ure	1							
ure	2							
ure	4							
ure	6							
ure	24							

ABSORPCIJA $w_A$ :	33	%
PREISKAVE: M. Mazurek	PREGLEDAL: dr. A. Petkovšek	
ZAČ. PREISKAVE: 25.03.2010		
KON. PREISKAVE: 25.03.2010		

### A3: Določanje vpijanja vode na materialu pesek Mokrice

<b>DOLOČANJE VPIJANJA VODE</b>								
<b>DIN 18132: 1995-12</b>								
LOKACIJA: HE MOKRICE			D.N.: Diplomaska naloga					
ZEMLJINA: PESEK								
<p> <b>priprava vzorca:</b> Pesek pod 0,500 mm.  <b>temperatura:</b> 25,3 °C  <b>masa vzorca <math>m_d</math>:</b> 1.000 g                 </p>								
	čas	ODČITEK (mL)		MASA VODE $m_w$ (g)		ABSORPCIJA $w_A$ (%)		
		vzorec 1	vzorec 2		vzorec 1	vzorec 2	vzorec 1	vzorec 2
sec	0	4,980	4,980		0,000	0,000	0	0
sec	15	4,710	4,720		0,270	0,260	27	26
sec	30	4,650	4,650		0,330	0,330	33	33
min	1	4,640	4,630		0,340	0,350	34	35
min	2	4,630	4,630		0,350	0,350	35	35
min	4	4,630	4,625		0,350	0,355	35	36
min	8	4,630	4,625		0,350	0,355	35	36
min	15							
min	30							
min	45							
ure	1							
ure	2							
ure	4							
ure	6							
ure	24							

The graph plots water absorption  $w_A$  (%) on the y-axis against time (čas) in minutes on the x-axis. The x-axis uses a logarithmic scale with major ticks at 0,1, 1, and 10. Two data series are shown: 'vzorec 1' (blue line with diamond markers) and 'vzorec 2' (red line with square markers). Both series start at (0,1, 0) and rise sharply to about 27% at 0,15 minutes. By 0,3 minutes, they reach approximately 33%. At 1 minute, they are at 34% and 35% respectively. From 1 minute onwards, the absorption values remain relatively constant, fluctuating slightly around 35%.

<b>ABSORPCIJA <math>w_A</math>:</b>	<b>35 %</b>
-------------------------------------	-------------

<b>PREISKAVE:</b> M. Mazurek	<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b> 25.03.2010	
<b>KON. PREISKAVE:</b> 25.03.2010	

## PRILOGA B: STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS

### B1: Standarden Proktorjev preskus na materialu glina Boršt

STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS DIN 18127						
LOKACIJA:	BORŠT					
ZEMLJINA:	GLINA					
oznaka cilindra:	1	energija nabijanja:				SPP
premer cilindra:	100 mm	število slojev:				3
višina cilindra:	120 mm	število udarcev/sloj:				25
volumen cilindra:	942 cm <sup>3</sup>	masa nabijala:				2,5 kg
gostota zrn:	2,73 t/m <sup>3</sup>	višina pada:				300 mm
največja zrna:	20 mm	energija:				0,6 MNm/m <sup>3</sup>
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6
masa cilindra+podlage (g)	5180	5180	5180	5180	5180	5180
cilinder+podlaga+zemljina (g)	6844	6962	7024	7100	7094	7072
masa zemljine (g)	1664	1782	1844	1920	1914	1892
gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1,77	1,89	1,96	2,04	2,03	2,01
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,54	1,63	1,66	1,69	1,67	1,63
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6
masa posodice (g)	269	268	624	984	1013	624
posodica+vlažna zemljina (g)	1928	2046	2466	2903	2927	2514
posodica+suha zemljina (g)	1719	1796,76	2183	2577	2584	2156
masa pome vode (g)	209	249,24	283	326	343	358
masa suhe zemljine (g)	1450	1528,76	1559	1593	1571	1532
vlažnost w (%)	14,4	16,3	18,2	20,5	21,8	23,4
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,54	1,63	1,66	1,69	1,67	1,63
količnik por e	0,77	0,68	0,65	0,61	0,64	0,68
stopnja saturacije $S_r$ (%)	51,16	65,52	76,41	90,94	93,46	94,13
<b>REZULTATI:</b>	optimalna vlaga	$w_{opt} =$	20,1	%		
	največja gostota	$\rho_{dmax} =$	1,68	t/m <sup>3</sup>		
<b>PREISKAVE:</b>	M. Mazurek			<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek		
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b>	21.04.2010					
<b>KON. PREISKAVE:</b>	29.04.2010			<b>PRILOGA:</b>		

## B2: Standarden Proktorjev preskus na materialu pesek Mokrice

STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS DIN 18127							
LOKACIJA:	HE MOKRICE						
ZEMLJINA:	PESEK z 7,5% finih zrn						
oznaka cilindra:	1	energija nabijanja:			SPP		
premer cilindra:	100 mm	število slojev:			3		
višina cilindra:	120 mm	število udarcev/sloj:			25		
volumen cilindra:	942 cm <sup>3</sup>	masa nabijala:			2,5 kg		
gostota zrn:	2,73 t/m <sup>3</sup>	višina pada:			300 mm		
največja zrna:	20 mm	energija:			0,6 MNm/m <sup>3</sup>		
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa cilindra+podlage (g)	5210	5180	5156	5182	5158	5212	5180
cilinder+podlaga+zemljina (g)	6942	6920	6970	6974	6934	6968	6934
masa zemljine (g)	1732	1740	1814	1792	1776	1756	1754
gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1,84	1,85	1,92	1,90	1,88	1,86	1,86
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,63	1,63	1,67	1,62	1,59	1,56	1,53
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa posodice (g)	1013	1011	1011	984	940	1011	982
posodica+vlažna zemljina (g)	2726	2728	2797	2776	2708	2750	2722
posodica+suha zemljina (g)	2537	2529	2558	2508	2428	2464	2413
masa pome vode (g)	189	199	239	268	280	286	309
masa suhe zemljine (g)	1524	1518	1547	1524	1488	1453	1431
vlažnost w (%)	12,4	13,1	15,4	17,6	18,8	19,7	21,6
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,63	1,63	1,67	1,62	1,59	1,56	1,53
količnik por e	0,67	0,67	0,64	0,69	0,72	0,75	0,78
stopnja saturacije $S_r$ (%)	50,63	53,30	66,27	69,86	71,32	71,40	75,33
<b>REZULTATI:</b>	optimalna vlaga	$w_{opt} =$	14,6	%			
	največja gostota	$\rho_{dmax} =$	1,66	t/m <sup>3</sup>			
<b>PREISKAVE:</b>	M. Mazurek			<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek			
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b>	26.03.2010						
<b>KON. PREISKAVE:</b>	31.03.2010			<b>PRILOGA:</b>			



### B3: Standarden Proktorjev preskus na materialu kamena moka

STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS DIN 18127							
LOKACIJA:		KAMNOLOM STAHOVICA					
ZEMLJINA:		KAMENA MOKA					
oznaka cilindra:	1	energija nabijanja:	SPP				
premer cilindra:	100 mm	število slojev:	3				
višina cilindra:	120 mm	število udarcev/sloj:	25				
volumen cilindra:	942 cm <sup>3</sup>	masa nabijala:	2,5 kg				
gostota zrn:	2,73 t/m <sup>3</sup>	višina pada:	300 mm				
največja zrna:	20 mm	energija:	0,6 MNm/m <sup>3</sup>				
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa cilindra+podlage (g)	5158	5210	5180	5180	5210		
cilinder+podlaga+zemljina (g)	6786	6940	6970	7100	7110		
masa zemljine (g)	1628	1730	1790	1920	1900		
gostota $q$ (t/m <sup>3</sup> )	1,73	1,84	1,90	2,04	2,02		
suha gostota $q_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,57	1,64	1,67	1,76	1,72		
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa posodice (g)	1013	939	622	1013	625		
posodica+vlažna zemljina (g)	2634	2663	2405	2926	2511		
posodica+suha zemljina (g)	2488	2477	2188	2663	2232		
masa porne vode (g)	146	186	217	263	279		
masa suhe zemljine (g)	1475	1538	1566	1650	1607		
vlažnost $w$ (%)	9,9	12,1	13,9	15,9	17,4		
suha gostota $q_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,57	1,64	1,67	1,76	1,72		
količnik por e	0,74	0,67	0,64	0,55	0,59		
stopnja saturacije $S_r$ (%)	36,67	49,49	59,43	78,59	80,43		
<p>Legend:  <span style="color: blue;">◆</span> Proctorjeva krivulja  <span style="color: red;">—</span> suha gostota pri <math>S_r=1</math>  <span style="color: black;">—</span> Polinomska (Proctorjeva krivulja)</p> <p>Equation: <math>y = -1,2724E-03x^3 + 4,9672E-02x^2 - 6,0723E-01x + 3,9526E+00</math></p>							
<b>REZULTATI:</b>	optimalna vlaga	$w_{opr} =$	16,2	%			
	največja gostota	$q_{dmax} =$	1,74	t/m <sup>3</sup>			
<b>PREISKAVE:</b>	M. Mazurek			<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek			
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b>	15.04.2010						
<b>KON. PREISKAVE:</b>	05.05.2010			<b>PRILOGA:</b>			

### B4: Standarden Proktorjev preskus na materialu pesek Stahovica

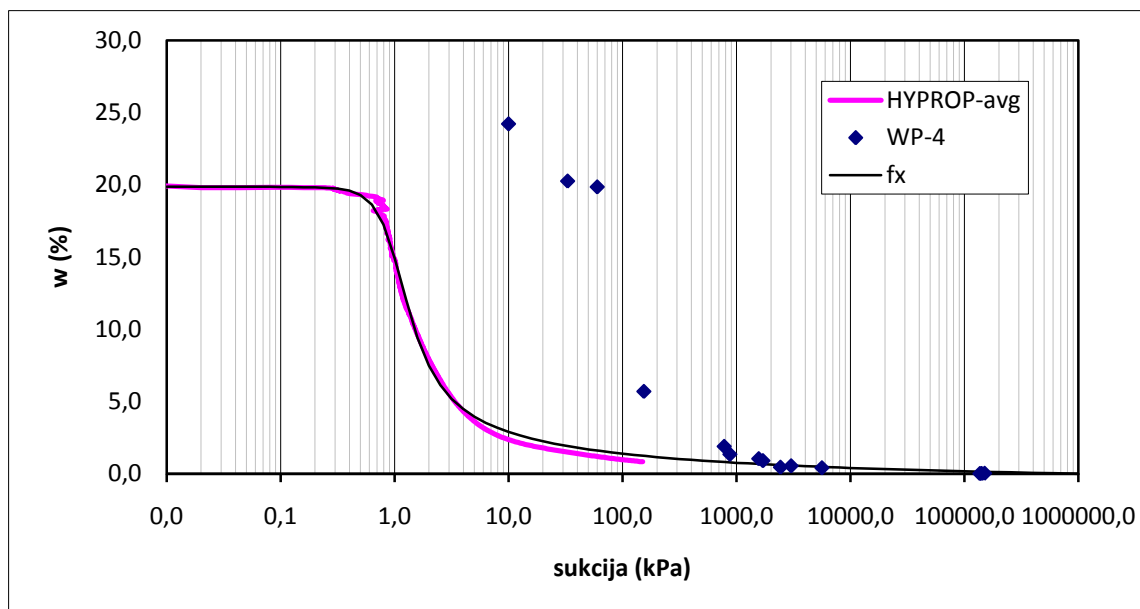
STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS DIN 18127						
LOKACIJA:		KAMNOLOM STAHOVICA				
ZEMLJINA:		PESEK 0/2 mm				
oznaka cilindra:	1	energija nabijanja:		SPP		
premer cilindra:	100 mm	število slojev:		3		
višina cilindra:	120 mm	število udarcev/sloj:		25		
volumen cilindra:	942 cm <sup>3</sup>	masa nabijala:		2,5 kg		
gostota zrn:	2,71 t/m <sup>3</sup>	višina pada:		300 mm		
največja zrna:	20 mm	energija:		0,6 MNm/m <sup>3</sup>		
DOLOČITEV GOSTOTE	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6
masa cilindra+podlage (g)	5158	5210	5180	5180	5158	5158
cilinder+podlaga+zemljina (g)	6858	6936	6924	6960	6978	7018
masa zemljine (g)	1700	1726	1744	1780	1820	1860
gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1,80	1,83	1,85	1,89	1,93	1,97
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,77	1,76	1,75	1,75	1,76	1,76
DOLOČITEV VLAGE	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6
masa posodice (g)	1014	1011	1009	981	1010	1011
posodica+vlažna zemljina (g)	2713	2734	2750	2759	2830	2867
posodica+suha zemljina (g)	2678	2666	2654	2630	2669	2665
masa porne vode (g)	35	68	96	129	161	202
masa suhe zemljine (g)	1664	1655	1645	1649	1659	1654
vlažnost w (%)	2,1	4,1	5,8	7,8	9,7	12,2
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,77	1,76	1,75	1,75	1,76	1,76
količnik por e	0,53	0,54	0,55	0,55	0,54	0,54
stopnja saturacije $S_r$ (%)	10,67	20,60	28,76	38,75	48,74	61,19
<b>REZULTATI:</b>	<b>optimalna vlaga</b>	$w_{opt} =$	<b>2,1</b>	<b>%</b>		
	<b>največja gostota</b>	$\rho_{dmax} =$	<b>1,77</b>	<b>t/m<sup>3</sup></b>		
<b>PREISKAVE:</b> M. Mazurek			<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek			
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b> 08.04.2010						
<b>KON. PREISKAVE:</b> 13.04.2010			<b>PRILOGA:</b>			

### B5: Standarden Proktorjev preskus na materialu pesek Stahovica 3

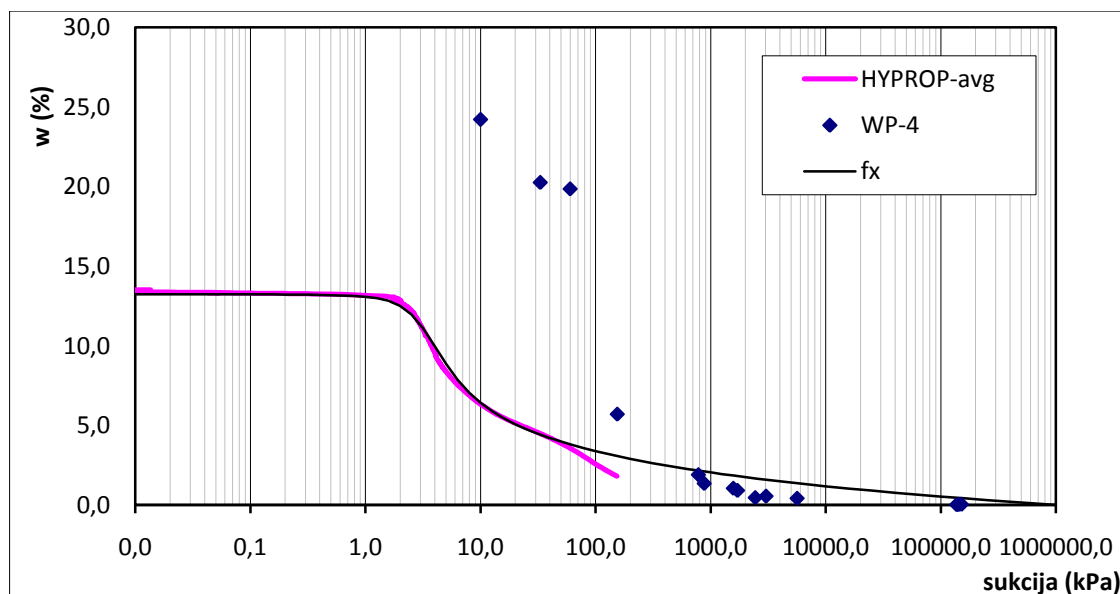
STANDARDEN PROKTORJEV PRESKUS DIN 18127							
LOKACIJA:		KAMNOLOM STAHOVICA					
ZEMLJINA:		PESEK STAHOVICA 3 (pripravljen vzorec v razmerju po znavosti)					
oznaka cilindra:	1	energija nabijanja:	SPP				
premer cilindra:	100 mm	število slojev:	3				
višina cilindra:	120 mm	število udarcev/sloj:	25				
volumen cilindra:	942 cm <sup>3</sup>	masa nabijala:	2,5 kg				
gostota zrn:	2,72 t/m <sup>3</sup>	višina pada:	300 mm				
največja zrna:	20 mm	energija:	0,6 MNm/m <sup>3</sup>				
<b>DOLOČITEV GOSTOTE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa cilindra+podlage (g)	3072	5180	5180	5210	5180	5158	
cilinder+podlaga+zemljina (g)	5020	7100	7106	7234	7196	7210	
masa zemljine (g)	1948	1920	1926	2024	2016	2052	
gostota $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	2,07	2,04	2,04	2,15	2,14	2,18	
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	2,01	1,92	1,89	1,97	1,94	1,95	
<b>DOLOČITEV VLAGE</b>	vzorec 1	vzorec 2	vzorec 3	vzorec 4	vzorec 5	vzorec 6	vzorec 7
masa posodice (g)	267,98	1010	621	1013	1012	981	
posodica+vlažna zemljina (g)	651,12	2917	2369	3001	2980	2955	
posodica+suha zemljina (g)	640,39	2809	2240	2834	2798	2746	
masa porne vode (g)	10,73	108	129	167	182	209	
masa suhe zemljine (g)	372,41	1799	1619	1821	1786	1765	
vlažnost w (%)	2,9	6,0	8,0	9,2	10,2	11,8	
suha gostota $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	2,01	1,92	1,89	1,97	1,94	1,95	
količnik por e	0,35	0,41	0,43	0,38	0,40	0,40	
stopnja saturacije $S_r$ (%)	22,24	39,46	49,75	65,43	69,35	81,39	
<b>REZULTATI:</b>	optimalna vlaga	$w_{opt} =$	9,2	%			
	največja gostota	$\rho_{dmax} =$	1,97	t/m <sup>3</sup>			
<b>PREISKAVE:</b>	M. Mazurek			<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek			
<b>ZAČ. PREISKAVE:</b>	07.05.2010						
<b>KON. PREISKAVE:</b>	11.05.2010			<b>PRILOGA:</b>			

## PRILOGA C: PREISKAVE SUKCIJE ZEMLJIN

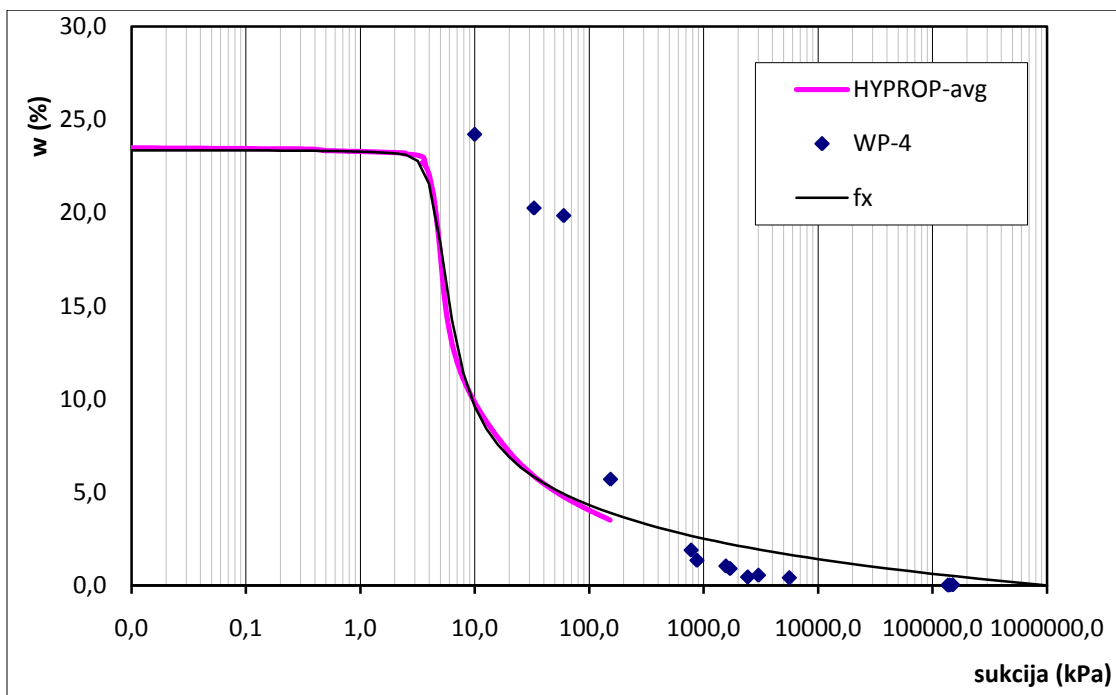
### C1: Retenzijske krivulje materiala pesek Stahovica



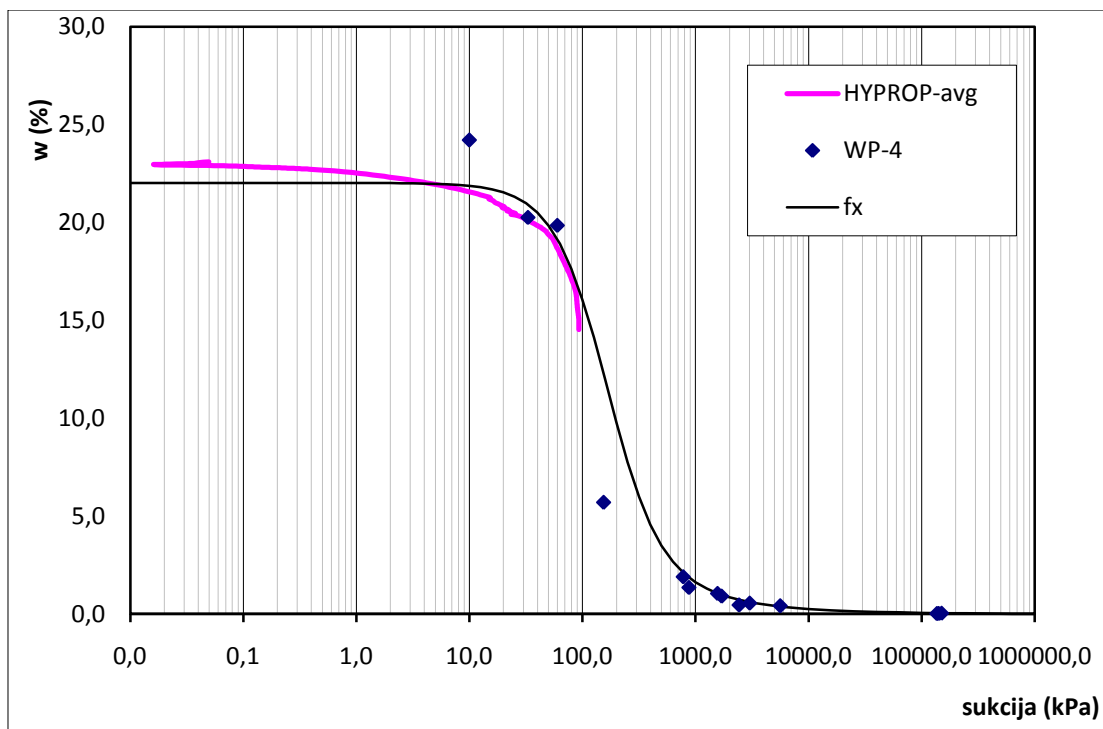
### C2: Retenzijske krivulje materiala pesek Stahovica 3



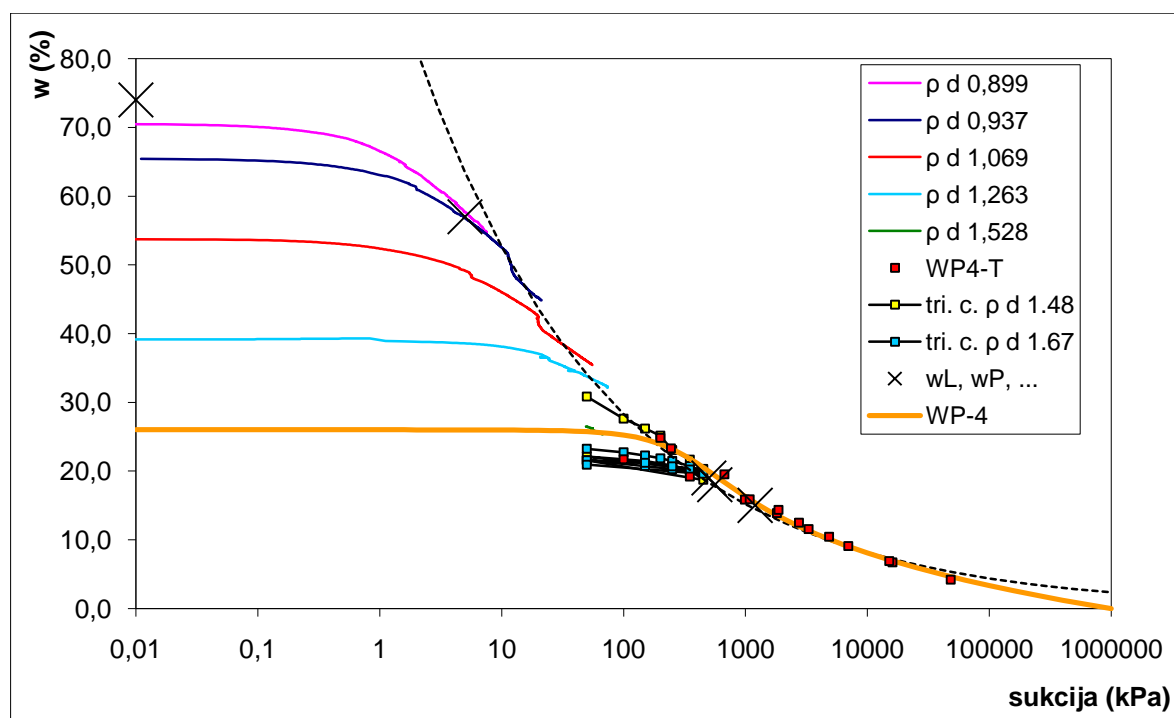
### C3: Retenzijske krivulje materiala pesek Mokrice



### C4: Retenzijske krivulje materiala kamena moka



### C5: Retenzijske krivulje materiala glina Boršt



**PRILOGA D: UGOTAVLJANJE ATTERBERGOVIH MEJA PLASTIČNOSTI**

<b>UGOTAVLJANJE VLAŽNOSTI</b> SIST/ISO/TS 17892-1:2004		<b>UGOTAVLJANJE ATTERBERGOVIH MEJA PLASTIČNOSTI</b> SIST/ISO/TS 17892-12:2004																																																																									
<b>LOKACIJA:</b> BORŠT, zrna pod 0,063 mm																																																																											
<b>OPIS ZEMLJINE:</b> CH, mastna glina, težkognetna, siva																																																																											
<b>NARAVNA VLAŽNOST</b>		<b>MEJA PLASTIČNOSTI</b>																																																																									
$m_p$ (g)	556,180	$m_p$ (g)	34,379    34,541																																																																								
$m_m$ (g)	1053,410	$m_m$ (g)	40,466    41,108																																																																								
$m_s$ (g)	976,930	$m_s$ (g)	39,537    40,094																																																																								
$w$ (%)	18,2	$w$ (%)	18,0    18,3																																																																								
$w_0 =$		$w_p =$																																																																									
18,2		18																																																																									
<b>priprava materiala za <math>w_p</math>:</b> posušen, zdrobljen, navlažen, narejen v svaljke na filterpapirju <b>priprava materiala za <math>w_L</math>:</b> sproti navlaževan, pregneten		<b>MEJA ŽIDKOSTI</b> konus: 60g/60°																																																																									
<b>ostanek na situ</b> 0,5    mm $m_{s,ost.}$ (g) $m_{s,pres.}$ (g) $p_a =$		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td><math>p</math> (mm)</td> <td>6,8</td> <td>6,8</td> <td>8,8</td> <td>8,7</td> <td>10,7</td> <td>11,0</td> <td>13,5</td> <td>13,1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>p_{povp}</math> (mm)</td> <td colspan="2">6,8</td> <td colspan="2">8,8</td> <td colspan="2">10,9</td> <td colspan="2">13,3</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><math>m_p</math> (g)</td> <td>34,540</td> <td colspan="2">34,377</td> <td colspan="2">34,899</td> <td colspan="2">34,821</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><math>m_m</math> (g)</td> <td>53,433</td> <td colspan="2">54,451</td> <td colspan="2">58,937</td> <td colspan="2">60,976</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><math>m_s</math> (g)</td> <td>47,285</td> <td colspan="2">47,429</td> <td colspan="2">50,116</td> <td colspan="2">50,893</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td><math>w</math> (%)</td> <td>48,2</td> <td colspan="2">53,8</td> <td colspan="2">58,0</td> <td colspan="2">62,7</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">konus</td> <td colspan="2">60g/60°</td> <td colspan="2" style="text-align: right;"><math>w_L =</math></td> <td colspan="2">57</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>		$p$ (mm)	6,8	6,8	8,8	8,7	10,7	11,0	13,5	13,1			$p_{povp}$ (mm)	6,8		8,8		10,9		13,3				$m_p$ (g)	34,540	34,377		34,899		34,821				$m_m$ (g)	53,433	54,451		58,937		60,976				$m_s$ (g)	47,285	47,429		50,116		50,893				$w$ (%)	48,2	53,8		58,0		62,7				konus		60g/60°		$w_L =$		57			
$p$ (mm)	6,8	6,8	8,8	8,7	10,7	11,0	13,5	13,1																																																																			
$p_{povp}$ (mm)	6,8		8,8		10,9		13,3																																																																				
$m_p$ (g)	34,540	34,377		34,899		34,821																																																																					
$m_m$ (g)	53,433	54,451		58,937		60,976																																																																					
$m_s$ (g)	47,285	47,429		50,116		50,893																																																																					
$w$ (%)	48,2	53,8		58,0		62,7																																																																					
konus		60g/60°		$w_L =$		57																																																																					
<b>Graf posedkov pod konusom</b>		<b>DODATEN OPIS VZORCA</b>																																																																									
		barva <input type="text" value="siva"/> (siva, črna,...) pesek <input type="text"/> gramoz <input type="text"/> ostalo <input type="text"/>																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td><math>p_a =</math></td> <td></td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>w_0 =</math></td> <td>18,2</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>w_p =</math></td> <td>18</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>w_L =</math></td> <td>57</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>I_p =</math></td> <td>39</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>I_L =</math></td> <td>0,00</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td><math>I_C =</math></td> <td>1,00</td> <td>%</td> </tr> </table>		$p_a =$		%	$w_0 =$	18,2	%	$w_p =$	18	%	$w_L =$	57	%	$I_p =$	39	%	$I_L =$	0,00	%	$I_C =$	1,00	%																																																					
$p_a =$		%																																																																									
$w_0 =$	18,2	%																																																																									
$w_p =$	18	%																																																																									
$w_L =$	57	%																																																																									
$I_p =$	39	%																																																																									
$I_L =$	0,00	%																																																																									
$I_C =$	1,00	%																																																																									
<b>PREISKAL:</b> M. Mazurek <b>ZAČ. PREISKAVE:</b> 10.05.2010 <b>KON. PREISKAVE:</b> 17.05.2010		<b>PREGLEDAL:</b> dr. A. Petkovšek  <b>PRILOGA:</b>																																																																									